

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Balatinec

ZAGREB, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

MATEMATIČKI MODEL BLOKA K U TETO ZAGREB

Mentor:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Student:

Luka Balatinec

ZAGREB, 2017.

*Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc.
Mislavu Čehilu na strpljenju i pomoći
pruženoj prilikom izrade ovog rada. Posebno
se zahvaljujem obitelji i prijateljima na
podršci za vrijeme pisanja rada.*

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zagreb, veljača 2017.

Luka Balatinec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Balatinec**

Mat. br.: 0035190195

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model Bloka K u TETO Zagreb**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of TETO Zagreb Unit K**

Opis zadatka:

U radu je potrebno napraviti matematički model Bloka K, koji je dio TETO Zagreb, u programskom paketu Ebsilon Professional. Blok K je kombinirano kogeneracijsko postrojenje električne snage 208 MW i toplinske snage 140 MW koje se sastoji od dvije plinske turbine, dva generatora pare na otpadnu toplinu i jedne parne turbine.

U rezultatima je potrebno prikazati ovisnost svih značajnih parametara, kao što su snaga plinskih turbina, snaga parne turbine, proizvodnja pare i termodinamička iskoristivost postrojenja, o opterećenju postrojenja i o okolišnjim uvjetima.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć prilikom izrade rada.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

1. rok: 24. veljače 2017.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.

3. rok: 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.

3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Sadržaj

Sadržaj	V
Popis slika	VII
Popis oznaka	X
Sažetak	XI
1. Uvod	1
1.1. Termoenergetska postrojenja	1
1.1.1. Parno-turbinska postrojenja	2
1.1.2. Plinsko-turbinska postrojenja	4
1.1.3. Kogeneracijska postrojenja	6
1.1.4. Kombinirana postrojenja	9
2. TE-TO Zagreb	11
2.1. Povijest	12
2.2. Glavni blokovi postrojenja	13
2.2.1. Blok C	13
2.2.2. Blok K	14
2.2.3. Blok L	14
2.3. Ostali blokovi i pomoćna postrojenja	15
3. EBSILON Professional	17

4. Matematički model	20
4.1. Opis modela	21
4.1.1. Osnovni elementi modela	21
4.1.2. Simulirani režimi rada	25
4.2. <i>Design mode i Off-design mode</i>	26
4.3. Stodolin zakon	27
5. Rezultati	30
5.1. Utjecaj promjene parametara atmosferskog zraka	30
5.1.1. Promjena atmosferskog tlaka	31
5.1.2. Promjena temperature vanjskog zraka	34
5.1.3. Promjena relativne vlažnosti vanjskog zraka	38
5.2. <i>Design i off-design mode</i> pojedinih režima rada	42
5.2.1. 1. režim rada	42
5.2.2. 2. režim rada	46
5.2.3. 3. režim rada	49
5.3. Promjena stupnja iskoristivosti postrojenja	52
6. Zaključak	55
Literatura	57

Popis slika

1.1	Shema parno-turbinskog procesa [1]	3
1.2	<i>Rankineov</i> kružni proces u T, s - dijagramu [2]	4
1.3	Shema i T, s - dijagram plinsko-turbinskog procesa [3]	5
1.4	Jednostavna shema kogeneracijskog procesa [4]	6
1.5	Shema protutlačnog i kondenzacijskog postrojenja [5]	7
1.6	Jednostavna shema kombiniranog postrojenja [6]	10
1.7	T, s - dijagram kombiniranog postrojenja [7]	10
2.1	Pogled na postrojenje TE-TO Zagreb [8]	11
2.2	Blokovi K i L [9]	12
3.1	Primjer postrojenja u <i>EBSILON</i> -u [10]	18
3.2	Simbolički prikaz generatora pare u <i>EBSILON</i> -u	19
4.1	Shema simulacije Bloka K unutar sučelja <i>EBSILON Professional</i>	21
4.2	Plinsko-turbinski dio s generatorima pare	22
4.3	Parno-turbinski dio s pripadajućim elementima	24
4.4	Prikaz <i>Stodolinog konusa</i> [11]	28
4.5	Omjer vrijednosti na osima [12]	28
5.1	Promjena masenog protoka zraka i dimnih plinova s promjenom atmo- sferskog tlaka	32
5.2	Promjena masenog protoka goriva s promjenom atmosferskog tlaka	32

5.3	Promjena proizvodnje električne energije na parnoj turbini s promjenom atmosferskog tlaka	34
5.4	Promjena masenog protoka zraka i dimnih plinova s promjenom temperature vanjskog zraka	35
5.5	Promjena masenog protoka goriva s promjenom temperature vanjskog zraka	35
5.6	Promjena izlaznog tlaka kompresora s promjenom atmosferskog tlaka . .	36
5.7	Promjena izlaznog tlaka kompresora s promjenom temperature vanjskog zraka	37
5.8	Promjena proizvodnje električne energije na parnoj turbini s promjenom temperature vanjskog zraka	37
5.9	Promjena ukupnog stupnja iskoristivosti s promjenom temperature vanjskog zraka	38
5.10	Promjena masenog protoka zraka i dimnih plinova s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka	39
5.11	Promjena masenog protoka goriva s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka	39
5.12	Promjena izlaznog tlaka kompresora s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka	41
5.13	Promjena proizvodnje električne energije na parnoj turbini s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka	41
5.14	T, s - dijagram procesa za 1. režim rada	43
5.15	h, s - dijagram procesa za 1. režim rada	43
5.16	T, s - dijagram procesa 1. režima rada za različita opterećenja	45
5.17	h, s - dijagram procesa 1. režima rada za različita opterećenja	45
5.18	T, s - dijagram procesa za 2. režim rada	46
5.19	h, s - dijagram procesa za 2. režim rada	47
5.20	T, s - dijagram procesa 2. režima rada za različita opterećenja	48
5.21	h, s - dijagram procesa 2. režima rada za različita opterećenja	48
5.22	T, s - dijagram procesa za 3. režim rada	49
5.23	h, s - dijagram procesa za 3. režim rada	50
5.24	T, s - dijagram procesa 3. režima rada za različita opterećenja	51
5.25	h, s - dijagram procesa 3. režima rada za različita opterećenja	51

5.26	Promjena ukupnog stupnja iskoristivosti s promjenom opterećenja plinske turbine	52
5.27	Promjena električnog stupnja iskoristivosti s promjenom opterećenja plinske turbine	52
5.28	Promjena toplinskog stupnja iskoristivosti s promjenom opterećenja plinske turbine	53

Popis oznaka

h_i	specifična entalpija radnog medija za stanje i [J/kg]	2
p_{21}	izlazni tlak za djelomično opterećenje turbine [bar]	28
p_2	izlazni tlak za puno opterećenje turbine [bar]	28
p_{0m}	maksimalni ulazni tlak turbine [bar]	28
p_{2m}	maksimalni izlazni tlak turbine [bar]	28
p_{01}	ulazni tlak za djelomično opterećenje turbine [bar]	28
p_0	ulazni tlak za puno opterećenje turbine [bar]	28
W	dobiveni rad na izlazu turbine [J]	2
Q_{23}	dovedena toplota [J]	2
T_{01}	ulazna temperatura za djelomično opterećenje turbine [K]	28
T_0	ulazna temperatura za puno opterećenje turbine [K]	28
ε_{21}	omjer izlaznog tlaka za djelomično opterećenje i maksimalnog izlaznog tlaka turbine, vidi jednadžbu (4.4)	28
ε_2	omjer izlaznog tlaka za puno opterećenje i maksimalnog izlaznog tlaka turbine, vidi jednadžbu (4.4)	28
ε_{01}	omjer ulaznog tlaka za djelomično opterećenje i maksimalnog ulaznog tlaka turbine, vidi jednadžbu (4.4)	28
ε_0	omjer ulaznog tlaka za puno opterećenje i maksimalnog ulaznog tlaka turbine, vidi jednadžbu (4.4)	28
η	termički stupanje djelovanja procesa	2

Sažetak

U ovom radu je opisan postupak izrade matematičkog modela Bloka K *TETO Zagreb*, kao primjera tipičnog kombiniranog kogeneracijskog postrojenja. Za pripremu i simulaciju rada modela, korišten je programski paket *EBSILON Professional*. Objašnjeno je funkcioniranje zadanog postrojenja u tri tipična režima rada, kao i rad prilikom različitih opterećenja postrojenja. U radu je objašnjeno kako pojedini relevantni parametri svojom promjenom utječu na rad postrojenja i u kojoj mjeri. Proveden je niz simulacija u zadanom programskom paketu kako bi se ustvrdilo ponašanje sustava za zadane režime uz promjenu relevantnih parametara, a rezultati su jasno prikazani dijagramima napravljenim uz pomoć programskih paketa *EBSILON Professional* i *MATLAB*.

Ključne riječi: *TETO Zagreb*, *EBSILON Professional*, kombinirana kogeneracija

1 | Uvod

Toplinska postrojenja su jedan od najstarijih i najraširenijih tipova postrojenja. Koriste se kao jedan od temeljnih izvora energije potrebne za osiguravanje kvalitete i održavanje visokog standarda ljudskog života. Glavni zadatak svih toplinskih postrojenja je pretvorba energije iz određenog primarnog oblika energije (fosilna goriva, obnovljivi izvori, nuklearna energija itd.) u energiju prikladnu za iskorištavanje u nekom proizvodnom ili industrijskom procesu (električna, ogrjevn, rashladna energija itd.). Život modernog čovjeka okruženog tehnologijom u gotovo svim aspektima života, kao i želja za ostvarivanjem visokog standarda življenja, nužno dovode do velikih potreba za proizvodnjom električne energije. Upravo je iz tog razloga električna energija temeljni oblik energije, koji se najčešće proizvodi u termoeenergetskim postrojenjima.

1.1. Termoeenergetska postrojenja

Termoeenergetska postrojenja su toplinska postrojenja koja vrše pretvorbu kemijske energije različitih goriva u mehaničku energiju, a ona se zatim pretvara u električnu i/ili toplinsku energiju. Navedena pretvorba kemijske energije vrši se pomoću različitih tipova energetske strojeva ovisno o tipu postrojenja. Tako najčešće govorimo o sagorijevanju goriva u plinskim turbinama ili ložištima generatora pare, a u nekim slučajevima moguće je koristiti i motore s unutarnjim izgaranjem. Glavni produkt izgaranje goriva su dimni plinovi. S obzirom na visoku temperaturu dimnih plinova, oni predstavljaju izvrstan radni medij, čijim prolaskom kroz parne generatore ili plinske turbine dobivamo paru visokih parametara ili izravno električnu energiju.

Općenito se termoeenergetska postrojenja, s obzirom na vrstu procesa koji se u njima koristi za pretvorbu energije, mogu podijeliti na sljedeće tipove: [13]

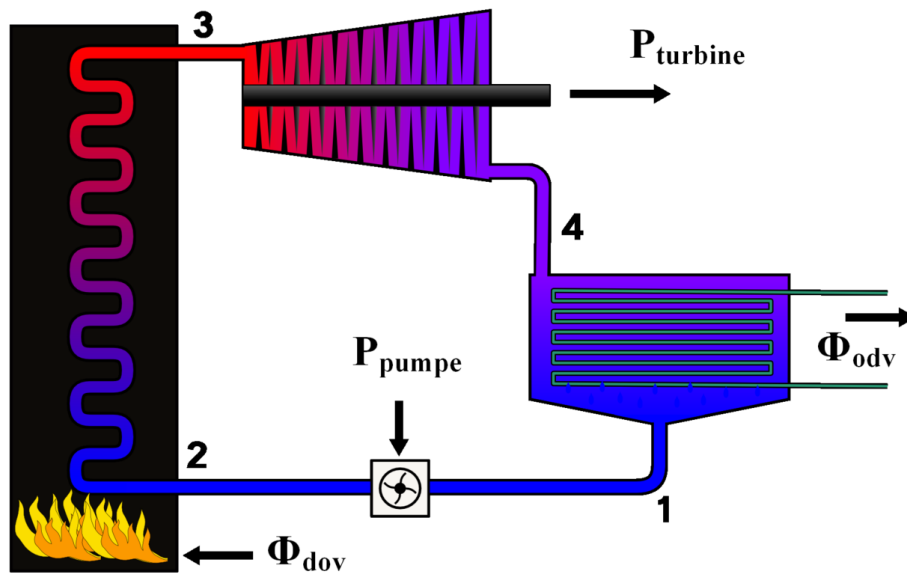
- Nuklearna postrojenja koja kao izvore energije koriste nuklearnu fisiju
- Manja postrojenja koja koriste motore s unutarnjim izgaranjem
- Parno-turbinska postrojenja
- Plinsko-turbinska postrojenja
- Kombinirana postrojenja
- Kogeneracijska postrojenja

1.1.1. Parno-turbinska postrojenja

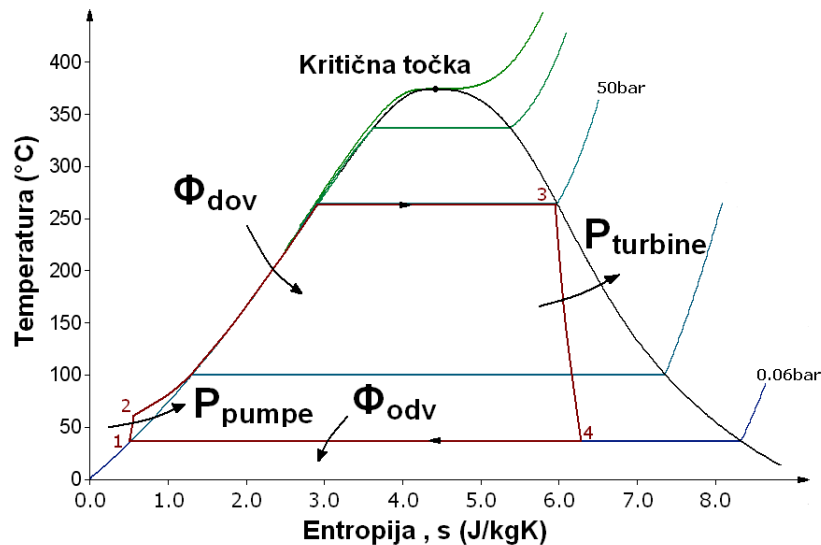
Parno-turbinska postrojenja temelje se na *Rankineovom* procesu i koriste se, uz nuklearne elektrane, za pokrivanje baznog opterećenja u većini modernih zemalja. Osnovna shema parno-turbinskog postrojenja prikazana na slici (Slika 1.1) pokazuje nam osnovne elemente ovakvog postrojenja. Kondenzat (ohlađena voda) se pumpom odvodi iz kondenzatora i uvodi u generator pare u kojem se toplina oslobođena izgaranjem goriva [14] koristi za zagrijavanje vode. Prolaskom kroz generator pare voda isparava i dolazi do nastajanje vodene pare visokih parametara (tlaka i temperature). Nastala vodena para odvodi se u parnu turbinu u kojoj ekspandira do nižih parametara, pri čemu dolazi do stvaranja mehaničke energije na vratilu turbine. Nastala mehanička energija se pomoću električnog generatora pretvara u električnu energiju, uz određene gubitke. Ekspandirana para na izlazu iz turbine odvodi se u kondenzator gdje u potpunosti kondenzira.

$$\eta = \frac{W}{Q_{23}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (1.1)$$

Termički stupanj iskoristivosti parno-turbinskog procesa računa se prema izrazu (1.1), kao omjer specifičnog rada dobivenog ekspanzijom pare u parnoj turbini i topline dovedene napojnoj vodi u generatoru pare. U realnom postrojenju postoji niz gubitaka koji nisu obuhvaćeni ovim izrazom, te iz tog razloga stupanj iskoristivosti realnog postrojenja iznosi svega 40–43%. Ovako nizak stupanj iskoristivosti postrojenja može se djelomično povisiti povećanjem srednje temperature dovođenja topline (korištenje međupregrijača, povišenje parametara svježe pare itd.), smanjenjem srednje temperature odvođenja topline snižavanjem temperature kondenzacije, korištenjem regenerativnih predgrijavanja napojne vode i drugim metodama. Za ovaj rad najinteresantnije metode povećanja stupnja iskoristivosti su integracija procesa u obliku kombi i kogeneracijskih postrojenja.



Slika 1.1: Shema parno-turbinskog procesa [1]

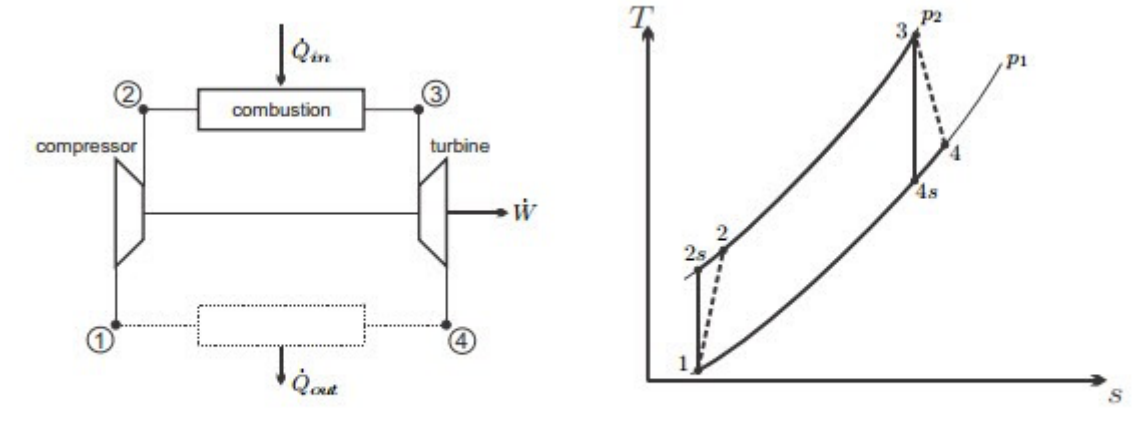


Slika 1.2: Rankineov kružni proces u T, s - dijagramu [2]

1.1.2. Plinsko-turbinska postrojenja

Plinsko-turbinska postrojenja također predstavljaju jedno od temeljnih termoenergetskih postrojenja. Proces plinsko-turbinskih postrojenja odvija se prema *Braytonovom* procesu prikazanom na slici (Slika 1.3 - desno). Prema shemi postrojenja (Slika 1.3 - lijevo) možemo vidjeti da su osnovne komponente plinsko-turbinskog postrojenja upravo kompresor, komora za izgaranje i turbina. Naime, zrak atmosferskog stanja (stanje 1) komprimira se u kompresoru do stanja 2 i uvodi u komoru za izgaranje. U komori izgaranja komprimiranom zraku dovodio se gorivo čijim se izgaranjem podiže toplinsko stanje zraka nastajanjem dimnih plinova (stanje 3). Nastali dimni plinovi stanja 3 odvođeni se u plinsku turbinu u kojoj se entalpijski pad dimnih plinova, prilikom njihove ekspanzije do stanja 4, pretvara u kinetičku energiju i zatim u mehanički rad, koji se koristi za proizvodnju električne energije na generatoru.

Ekspandirani plinovi stanja 4 ispuštaju se u atmosferu. S obzirom na to da zrak koji koristimo u kompresoru uzimamo iz okoliša, a ekspandirane dimne plinove također ispuštamo u okoliš, točku 1 i 4 možemo povezati linijom koja predstavlja izobarno hlađenje pri tlaku koji odgovara tlaku okoliša. Važno je primijetiti da se kompresor



Slika 1.3: Shema i T, s - dijagram plinsko-turbinskog procesa [3]

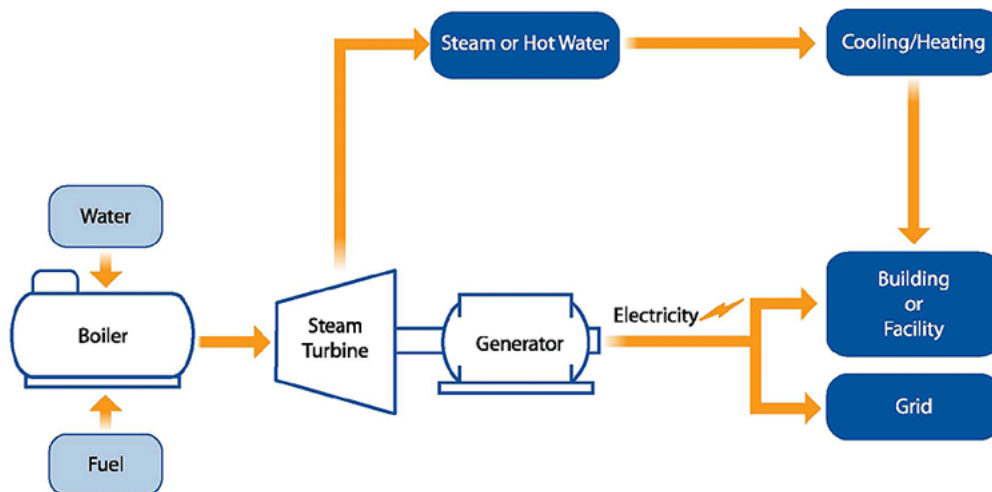
i turbina nalaze na istom vratilu, čime se rad potreban za komprimiranje zraka u kompresoru dobiva izravno od rada dobivenog ekspanzijom dimnih plinova u turbini.

$$\eta = \frac{W}{Q_{23}} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)}{(h_3 - h_2)} = 1 - \frac{(h_4 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (1.2)$$

Analiza *Braytonovog* ciklusa slična je analizi *Rankineovog* ciklusa, ali za idealni plin, što se može vidjeti iz izraza za termički stupanj iskoristivosti *Braytonovog* procesa (Izraz 1.2)[15]. S obzirom na to da u *Braytonovom* plinsko-turbinskom procesu nemamo promjenu faze radnog medija i nemamo potrebu za korištenjem kondenzatora, imat ćemo i veći omjer dobivenog rada u odnosu na uloženu toplinu te stoga veći termički stupanj iskoristivosti. Naravno, kao i kod realnih parno-turbinskih postrojenja, tako ćemo i kod realnih plinsko-turbinskih postrojenja imati gubitke, koji će utjecati na efikasnost realnih postrojenja. Najveći gubici nastaju bacanjem dimnih plinova visoke temperature u okoliš. Postoje različita rješenja za smanjenje energetske gubitaka i povećanje efikasnosti, a za ovaj će rad najzanimljivije rješenje biti primjena kombiniranih i kogeneracijskih postrojenja.

1.1.3. Kogeneracijska postrojenja

Jedan od osnovnih problema parno-turbinskih postrojenja je mala efikasnost zbog velikih gubitaka topline u procesu. Jedan od najvećih izvora toplinskih gubitaka je upravo gubitak one topline koja se hlađenjem kondenzatora nepovratno baca u okoliš. Ideja iskorištavanja te topline umjesto njenog gubitka, temelj je kogeneracije kao učinkovitijeg iskorištavanja energije. Kogeneracija predstavlja vezanu proizvodnju električne i, najčešće, toplinske energije u jedinstvenom procesu. Zasniva se na ideji iskorištavanja otpadne topline iz procesa proizvodnje električne energije za proizvodnju toplinske energije (Slika 1.4).



Slika 1.4: Jednostavna shema kogeneracijskog procesa [4]

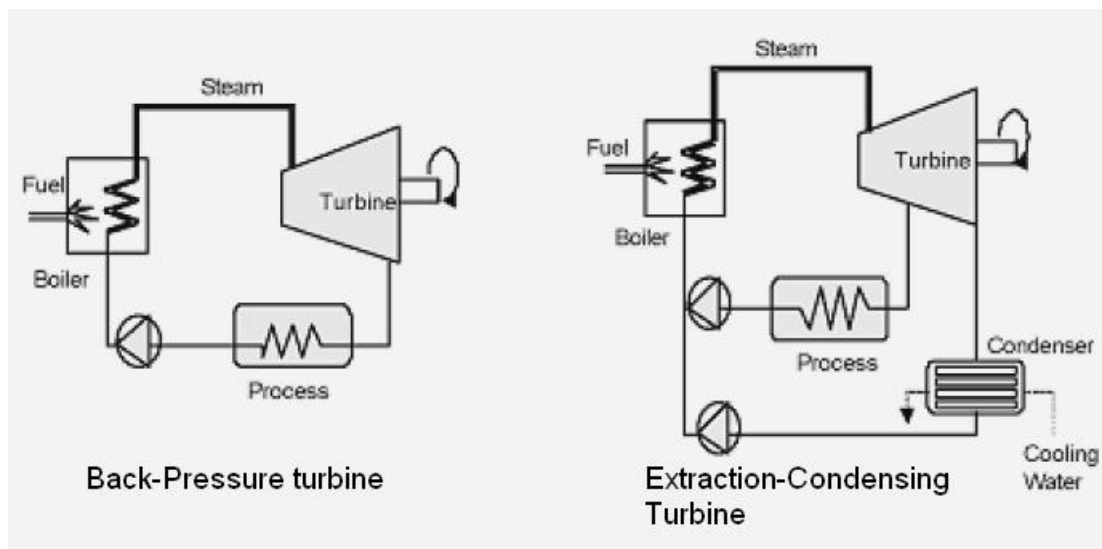
Toplinska energija nastala kogeneracijom može se koristiti u industrijskim i proizvodnim procesima, ali i kao izvor topline za grijanje prostora. S obzirom na to da ti procesi najčešće ne zahtijevaju paru visokih parametara, kogeneracijom se proizvodi para niskih parametara, vrela ili topla voda. Time je omogućena integracija procesa proizvodnje pare visokih parametara, koja se koristi u proizvodnji električne energije na parnoj turbini te procesa proizvodnje pare niskih parametara za potrebe industrije ili grijanja, a da pri tome ne dolazi do velikih gubitaka. Osnovna svrha kogeneracije je postizanje određene uštede u primarnoj energiji u odnosu na odvojenu proizvodnju toplinske i električne energije.

Neki od najčešćih tipova kogeneracijskih postrojenja su:

- postrojenja s protutlačnom turbinom
- postrojenja s kondenzacijskom turbinom i reguliranim odvođenjem
- postrojenja s iskorištavanjem otpadne topline dimnih plinova

Postrojenja protutlačne turbine

Postrojenja koja primjenjuju protutlačnu turbinu su, prema načinu rada, slična klasičnom parno-turbinskom procesu, ali omogućuju istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije. Kao i u klasičnom parno-turbinskom procesu, vodu zagrijavamo u generatoru pare pomoću topline oslobođene izgaranjem goriva te time dobivamo vodu paru visokih parametara, koja se odvodi do parne turbine povezane s električnim generatorom. Za razliku od klasičnog procesa, ovdje koristimo protutlačnu turbinu u kojoj se ekspanzija odvija do nekog protutlaka, određenog odgovarajućom temperaturom zasićenja, koja odgovara temperaturi potrebnoj za odvijanje nekog industrijskog procesa (Slika 1.5 - lijevo).



Slika 1.5: Shema protutlačnog i kondenzacijskog postrojenja [5]

Takav sustav ima izrazito krutu vezu između proizvodnje električne i toplinske energije, s obzirom na to da je proizvodnja električne energije izravno povezana s potrebom za proizvodnjom korisne topline, i obrnuto. Smanjenjem potrebe za proizvodnjom industrijske pare (ili pare za grijanje), smanjuje se potreba za ulaskom pare visokih parametara u protutlačnu turbinu, a time se izravno smanjuje proizvodnja električne energije. Kako bi se pogon učinio fleksibilnijim, najčešće se koristi obilazni vod oko turbine s *reducir* ventilom. Naime, u slučaju kada nam je potrebno više pare za proizvodnju toplinske energije nego što je potrebno za proizvodnju električne energije, u turbinu možemo dovesti točno onoliko pare koliko je zahtijevano za proizvodnju električne energije. Korištenjem obilaznog voda, potrebnu količinu pare dovodimo do potrošača topline, zaobilazeći turbinu. *Reducir* ventil nam omogućava da se višak pare ispusti u atmosferu, ako je to potrebno. Osnovni problem ovakvih sustava je i dalje velika krutost te nemogućnost istovremenog zadovoljavanja potreba za proizvodnjom električne i toplinske energije. Najčešće se sustav postavlja na način da prvenstveno zadovolji potrebu za proizvodnjom toplinske energije.

Postrojenja s kondenzacijskom turbinom i reguliranim oduzimanjem pare

Svrha ovakvih postrojenja je upravo u rješavanju glavnog nedostatka postrojenja s protutlačnom turbinom. Naime, korištenjem kondenzacijske turbine s reguliranim oduzimanjem, pare uvodimo mogućnost regulacije proizvodnje toplinske, ali i električne energije (Slika 1.5 - desno).

Osnovni zahtjev kod ovakvog tipa postrojenja je korištenje turbine s najmanje dva stupnja, jednim visokotlačnim stupnjem (VT) i jednim niskotlačnim stupnjem (NT). Kao i kod postrojenja s protutlačnom turbinom i ovdje koristimo obilazni vod s *reducir* ventilom, ali oko VT stupnja turbine, što nam omogućuje bolju regulaciju procesa. Između VT i NT stupnja vrši se regulirano oduzimanje pare. Para se oduzima pri tlaku koji odgovara tlaku potrebnom u procesu u kojem se ta para koristi. Regulacijom oduzimanja pare možemo regulirati toplinsku energiju koja se dobiva iz procesa, a regulacijom protoka kroz kondenzacijski dio turbine reguliramo proizvodnju električne energije.

Obično se kod ovakvih postrojenja govori o dva granična režima pogona. U slučaju da nema potrebe za proizvodnjom toplinske energije, te se sva para koristi za proizvodnju električne energije, govorimo o čistom kondenzacijskom pogonu. S druge strane, ako imamo slučaj u kojem je potreba za proizvodnjom toplinske energije toliko velika da se sva para mora iskoristiti za proizvodnju toplinske energije, te ne preostaje pare za NT stupanj turbine i proizvodnju električne energije, tada govorimo o čistom protutlačnom pogonu. Važno je napomenuti da čisti protutlačni pogon u stvarnosti nije moguće postići. Naime, potrebno je u svakom trenutku osigurati neki minimalni protok pare kroz niskotlačni dio turbine, ne bi li se omogućilo hlađenje elemenata NT dijela turbine. Najčešće se minimalni protok kroz NT dio turbine određuje kao 10% od nazivnog protoka, te se taj protok pare smatra dovoljnim za rad bez pregrijavanja i oštećenja dijelova turbine.

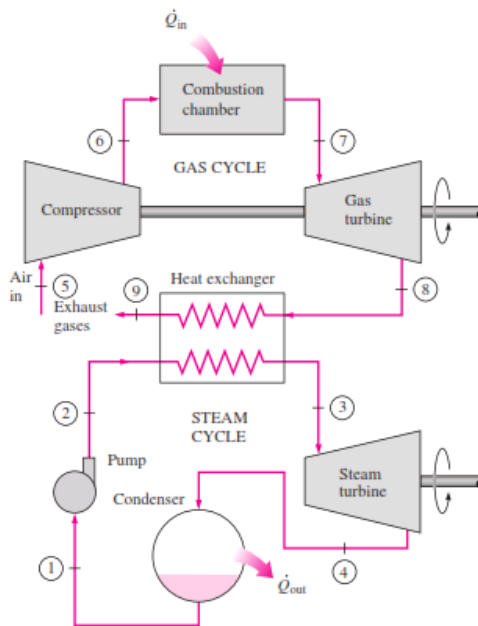
Rad postrojenja s kondenzacijskom turbinom reguliran je tako da prvenstveno pogoduje proizvodnji električne energije i upravo se iz tog razloga koristi u pogonima gdje je bitna kontinuirana opskrba električnom energijom.

Postrojenje s plinskom turbinom i korištenjem otpadne topline dimnih plinova

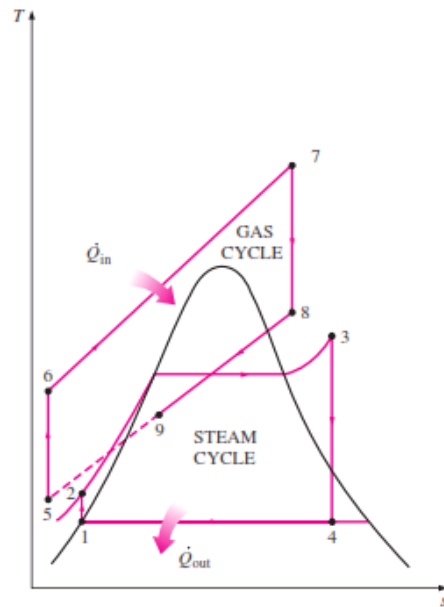
Ovaj specifičan oblik kogeneracije podrazumijeva korištenje već spomenutog parno-turbinskog procesa, ali na način da se toplina potrebna za zagrijavanje vode i nastanak vodene pare ne dobiva izgaranjem nekog goriva u ložištu generatoru pare, već korištenjem ispušnih dimnih plinova iz plinsko-turbinskog procesa kao izvora topline. Time se dimni plinovi visoke temperature na izlazu iz plinske turbine ne bacaju u okoliš već se iskorištavaju za proizvodnju pare. Takvi se sustavi zbog kombinacije dvaju procesa nazivaju plinsko-parnim kombiniranim energetske sustavima.

1.1.4. Kombinirana postrojenja

Zbog ograničenosti današnjih spoznaja na području materijala koje koristimo u termoelektričkim postrojenjima, pojavljuju se određena ograničenja i u pogledu parametara (temperature i tlaka) radnog medija u procesima tih postrojenja.



Slika 1.6: Jednostavna shema kombiniranog postrojenja [6]



Slika 1.7: T, s - dijagram kombiniranog postrojenja [7]

Tako je kod klasičnog parno-turbinskog postrojenja maksimalna temperatura vodene pare kao radnog medija ograničena na oko 600°C , čime je i stupanj djelovanja procesa ograničen na oko 45%. Kod plinsko-turbinskih postrojenja, zbog ograničenja materijala plinske turbine, maksimalna temperatura na ulazu u plinsku turbinu iznosi oko 1500°C , dok na izlazu iz turbine dimni plinovi zadržavaju temperaturu od približno 600°C , te zato govorimo o stupnju djelovanja do 40%.

Uvođenjem kombiniranja plinske turbine s proizvodnjom pare u generatoru pare na ispušne dimne plinove (eng. *HRSG - Heat Recovery Steam Generator*), te odvođenjem i ekspanzijom nastale pare u parnoj turbini, iskorištavamo oba temperaturna gradijenta (Slika 1.6) od 1500°C do 600°C u plinskoj turbini te od 600°C do minimalno 25°C u generatoru pare. Ovakav kombinirani ciklus omogućuje smanjenje gubitaka koji nastaju odvojenom proizvodnjom u zasebnim ciklusima, te dopušta postizanje znatno većih stupnjeva djelovanja (do 60%), a time i znatno manji utjecaj na okoliš, što je sve važniji zahtjev kod modernih termoenergetskih sustava (Slika 1.7).

2 | TE-TO Zagreb

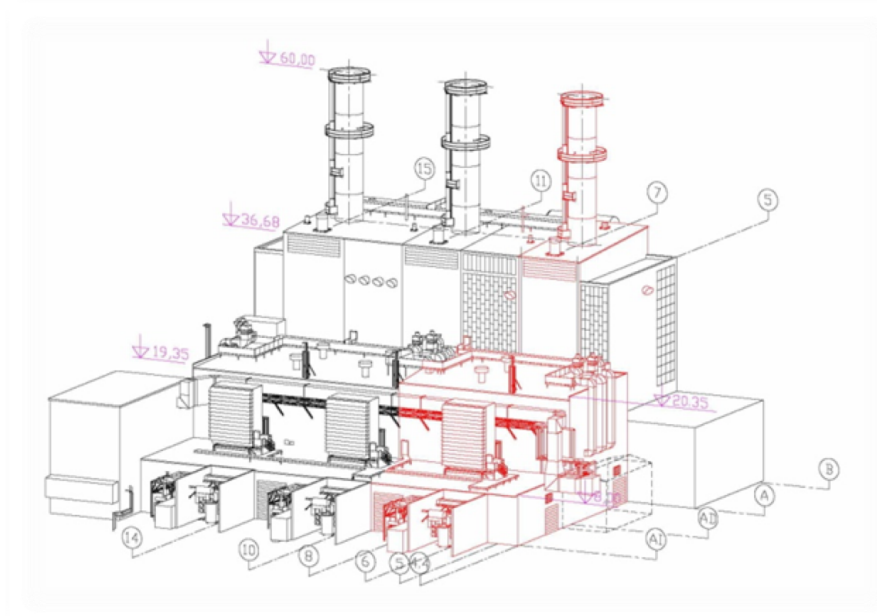
Termoelektrana – toplana Zagreb (Slika 2.1) smještena je na istočnom dijelu grada Zagreba u neposrednoj blizini rijeke Save, koja predstavlja ključan dio svakodnevnih operacija pogona. Iako se TE-TO nalazi na području industrijske zone Žitnjak, svojom djelatnošću zadovoljava potrebe puno šireg područja.



Slika 2.1: Pogled na postrojenje TE-TO Zagreb [8]

2.1. Povijest

TE-TO Zagreb započeo je radom još 1962. godine s dva bloka (blok A i blok B). Ti su blokovi koristili ugljen i zemni plin kao gorivo za zadovoljavanje energetske potrebe pogona, a proizvodili su ukupno 64 MW_e i 80 MW_t energije. [9] Zbog sve većih potreba za dobavom električne, ali i toplinske energije na području grada Zagreb, pojavila se potreba za nadogradnjom postojećeg pogona. Tako je 1979. godine dograđen još jedan dodatni blok (blok C), kao i dodatne vrelovodne i parne kotlovnice. Novosagrađeni blok C imao je puno veću proizvodnju električne i toplinske energije, postižući snage od 120 MW_e i 200 MW_t . U kasnijim godinama, već dotrajali blokovi A i B, sanirani su i na njihovom je mjestu sagrađena nova generacija blokova. Novi blokovi (blok K i L) predstavljaju novu generaciju kombiniranih kogeneracijskih postrojenja povećane učinkovitosti (Slika 2.2). Blok K, pušten u pogon 2001. godine, nazivne je snage 208 MW_e i 140 MW_t . Blok L je pušten u pogon 2009. godine, nazivne snage 112 MW_e i 110 MW_t , a od kraja 2015. godine bloku L odobren je status povlaštenog proizvođača električne energije od strane Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA). [16]



Slika 2.2: Blokovi K i L [9]

2.2. Glavni blokovi postrojenja

2.2.1. Blok C

Već je spomenuto da je blok C sagrađen radi zadovoljavanja povećanih potreba za električnom i toplinskom energijom 1979. godine. Temelj bloka jest kotao za proizvodnju pare strmocijevnog, radijacijskog tipa s prirodnom cirkulacijom i jednim bubnjem, tvrtke *TGME*. Kotao može proizvesti do 500 t/h svježe pare parametara 140 bar i 560°C. Ložište generatora pare ima osam vrtložnih plinsko-mazutnih plamenika proizvedenih od tvrtke *Alstom*. Zahvaljujući tome, kao gorivo je moguće koristiti mazut (teško loživo ulje) ili prirodni plin. Samo ložište kotla prizmatičnog je oblika dimenzija 7680 x 13520 mm, dok su plamenici smješteni na stražnjem ekranu ložišta. Ekonomajzeri su izvedeni tako da su ekrani i stijenke prijelaznih kanala ekonomajzera membranskog tipa, a šamotom su zaštićeni pod, područje oko plamenika i područje oko samih kolektora ekonomajzera. Sustav za pregrijavanje pare sastoji se od konvektivnih pregrijača pare vertikalnog tipa. Pregrijači su raspoređeni u prijelaznom dijelu horizontalnog dimnog kanala. [8]

Doprema zraka u sustav, kao i odvođenje dimnih plinova, omogućeno je sustavom tlačnih i vlačnih ventilatora zraka. Vanjski se zrak doprema u sustav korištenjem dva tlačna ventilatora velike protočnosti koji usmjeravaju vanjski zrak kroz parne zagrijače zraka na regenerativne zagrijače zraka. Tako se zagrijačima zagrijani zrak otprema do plamenika generatora pare. Za zagrijavanje vanjskog zraka u regenerativnim zagrijačima koriste se dimni plinovi na izlazu iz posljednjeg ekonomajzera vode. Oni se zatim usisnim ventilatorima, nakon odgovarajuće obrade, izbacuju dimnjakom u okoliš.

Osnovni dio sustava za proizvodnju električne energije Boka C je kondenzacijska parna turbina ruske tvrtke *UTMZ*. Turbina je izvedena kao troosovinska s tri kućišta podijeljena na visokotlačni, srednjetačni i niskotlačni dio. Parametri pare pri ulasku u turbinu su 480 t/h i 555°C, a na turbini postoje i dva regulirana oduzimanja pare. Para oduzeta iz turbine koristi se u dva vrelovodna zagrijača vode ZVV-1 i ZVV-2. Nominalna snaga turbine je 110 MW pri brzini vrtnje od 3000 min⁻¹, a povezana je s trofaznim sinkronim generatorom tvrtke *Končar*, nominalne snage 120 MW.

2.2.2. Blok K

Blok K, najinteresantniji za ovaj rad, kombinirano je kogeneracijsko postrojenje. Sastoji se od kombinacije dvije plinske turbine nazivnih snaga 71 MW, povezanih s dva generatora pare na otpadnu toplinu ispušnih dimnih plinova. Dimni plinovi na izlasku iz plinskih turbina tvrtke *General Electric*, zadržavaju temperaturu od oko 600°C, te se odvođe u generatore pare, u kojima se koriste za proizvodnju pare. Para proizvedena u oba generatora odvođi se na zajedničku kondenzacijsku parnu turbinu. Plinske turbine imaju nominalnu brzini vrtnje od 5235 min⁻¹.

Parna turbina, proizvodnje *ABB Karlovac*, jednokućišna je akcijska kondenzacijska turbina u 19 stupnjeva. Turbina je izvedena s dva regulirana oduzimanja pare koja se koriste za proizvodnju industrijske pare i zagrijavanje magistralne vode preko vrelovodnog zagrijača C4. Para ulazi u turbinu s protokom od 218 t/h, 90,8 bar i 539°C, a po izlasku iz turbine odvođi se u kondenzator. Nazivna snaga turbine, pri brzini vrtnje od 3000 min⁻¹, iznosi 66 MW. Obje plinske i parna turbina koriste trofazne sinkrone električne generatore hlađene zrakom, brzine vrtnje 3000 min⁻¹. Kao gorivo za plinske turbine prvenstveno se koristi prirodni plin, ali su turbine izvedene tako da je u slučaju nedostatka prirodnog plina moguće koristiti i specijalno lako loživo ulje.

Kotlove bloka K, tj. generatore pare na otpadnu toplinu ispušnih dimnih plinova, proizvela je tvrtka *Samsung*, a izvedeni su kao kotlovi s vertikalnim strujanjem dimnih plinova. Podijeljeni su na dva tlačna sustava. U visokotlačnom dijelu se producira para viših parametara (94,7 bar, 540°C i 109 t/h), a u niskotlačnom dijelu para nižih parametara (10,3 bar, 287°C i 12 t/h). Kotao koristi jedan zajednički napojni spremnik za visokotlačni i niskotlačni dio, dok je visokotlačni bubanj pozicioniran na stražnjoj, a niskotlačni bubanj na prednjoj strani kotla.

2.2.3. Blok L

Blok L, također kombinirano kogeneracijsko postrojenje, izvedeno je slično bloku K. Razlika u odnosu na blok K je prvenstveno u tome što blok L sadrži samo jednu plinsku turbinu i samo jedan generator pare na otpadnu toplinu ispušnih dimnih plinova. Proizvedena para se, kao i kod bloka K, odvođi na kondenzacijsku parnu turbinu.

Plinska turbina bloka L također je proizvod tvrtke *General Electric*, ali suvremenije izvedbe nego kod bloka K. Zahvaljujući tome, nazivna snaga turbine pri brzini vrtnje od 3000 min^{-1} , iznosi 75 MW. Plinska turbina kao gorivo koristi prirodni plin. Parnu turbinu proizvela je tvrtka *Škoda*, a turbina je jednokućišna, akcijska kondenzacijska turbina, nazivne snage 40 MW, pri brzini vrtnje 3000 min^{-1} . Izvedena je s 27 stupnjeva i dva regulirana oduzimanja pare, s parametrima svježe pare na ulazu u turbinu od 125 t/h, 91 bar i 537°C . Oduzimanja pare koriste se za zagrijavanje vode pomoću vrelovodnih zagrijača C5 i C6.

Kotao na otpadnu toplinu ispušnih dimnih plinova proizvelo je poduzeće *Đuro Đaković – TEP*, a kotao je, kao i kod bloka K, izveden s vertikalnim protokom dimnih plinova i visokotlačnim i niskotlačnim sustavom voda-para. Visokotlačna para ima više parametre (95 bar, 540°C i 107 t/h), a niskotlačna niže parametre (11 bar, 267°C i 16 t/h). Spremnici napojne vode ovog kotla nalaze se s desne strane kotla, visokotlačni bubanj na stražnjoj, a niskotlačni bubanj na prednjoj strani kotla. Električni generatori na turbinama su trofazni, sinkroni, hlađeni zrakom i postižu brzinu vrtnje od 3000 min^{-1} .

2.3. Ostali blokovi i pomoćna postrojenja

Blok D je stariji blok koji se primarno koristi kao pomoćni parni kotao. Pogonjen je prirodnim plinom, teškim loživim uljem ili njihovom kombinacijom, a proizvodi 65 t/h pare pri tlaku od 17 bar i temperaturi 230°C .

Blokovi E i F, nekada označavani kao vrelovodni kotlovi VK-3 i VK-4, kao gorivo koriste prirodni plin i služe kao vrelovodni kotlovi učinka 58MW, koji zagrijavaju vrelu vodu sa 120°C na 150°C .

Blokovi G i H, nekada označavani kao VK-5 i VK-6, kao gorivo mogu koristiti prirodni plin, teško loživo ulje ili njihovu kombinaciju. Osnovna funkcija im je, kao vrelovodnim kotlovima, zagrijavanje vrele vode sa 120°C na 150°C .

U pomoćna postrojenja ubrajamo: postrojenje za kemijsku pripremu vode (KPV), crpnu stanicu SAVA, postrojenje za dopremu goriva i elektroenergetsko postrojenje.

Postrojenje za pripremu vode crpi vodu za obradu iz bunara na području TE-TO Zagreb, ta se voda zatim kemijski obrađuje i demineralizira u ionskim izmjenjivačima u novom i starom postrojenju za pripremu vode, kapaciteta po 300 t/h. Tako pripremljena voda koristi se kao napojna voda za parne kotlove. Postoji i rezerva napojne vode u spremnicima velikih kapaciteta. Crpna stanica doprema vodu iz rijeke Save, koja se nakon prolaska kroz nekoliko stupnjeva filtracije, koristi kao rashladna voda u postrojenju, a prvenstveno kao voda za hlađenje kondenzatora.

Doprema tekućeg goriva vrši se željezničkim cisternama, te se istovaruje i pohranjuje u spremnicima. Postoji pet spremnika teškog loživog ulja ukupnog kapaciteta 75000 m³ te jedan spremnik za lako specijalno loživo ulje kapaciteta 5000 m³. Prirodni se plin doprema izravno, plinovodom, od *PRMS Zagreb-Istok* do stare reduksijske stanice 50/6,5 (prvenstveno za opskrbu bloka C), odnosno nove reduksijske stanice 50/30 (za opskrbu novijih blokova K i L). [8]

Elektroenergetsko postrojenje sadrži sve uređaje, instalacije i sustave za upravljanje, nadzor i regulaciju procesa proizvodnje, transformacije i prijenosa električne energije. Sadrži i sustave za upravljanje pomoćnim uređajima potrebnim u proizvodnji.

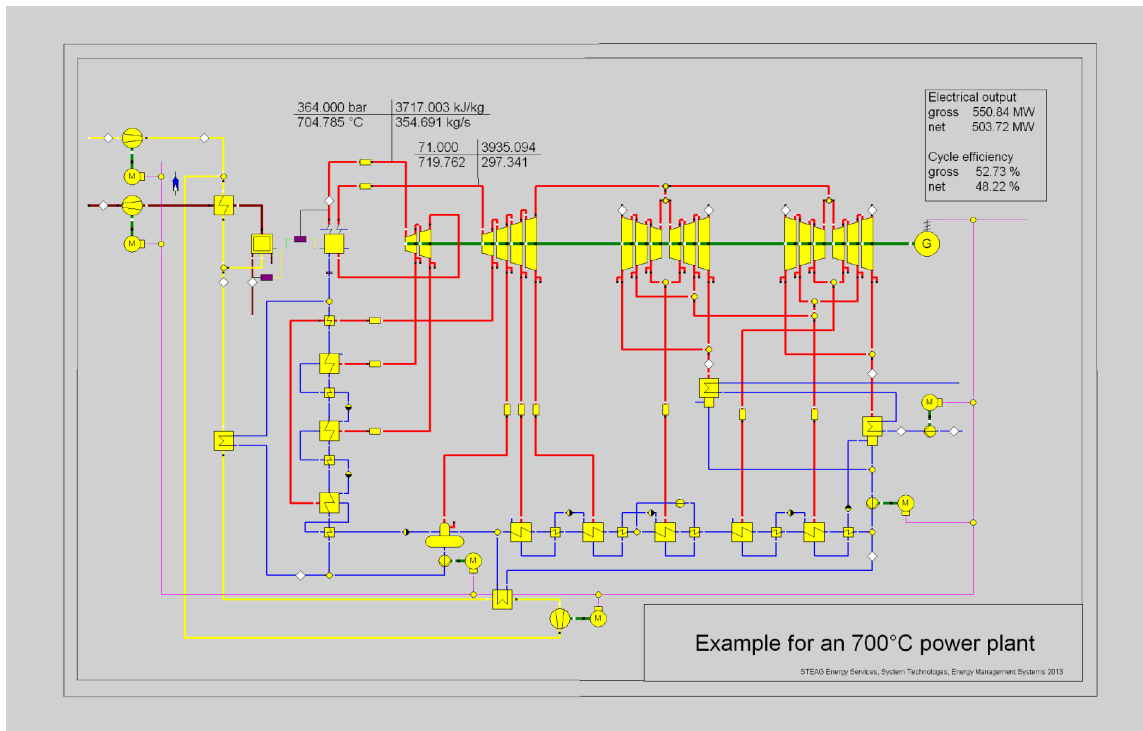
3 | EBSILON Professional

EBSILON Professional je programski paket namijenjen prvenstveno modeliranju termodinamičkih procesa. Njegova je glavna primjena na području modeliranja i optimizacije kružnih procesa korištenih u termoenergetskim postrojenjima.

Program je nastao još 1991. godine od strane autora *Johannesa Janicke*. Nakon skromnih početaka, kao relativno jednostavni program za izračun termodinamičkih procesa u *DOS* programskom okruženju, prodan je *STEAG* grupi. *STEAG* grupa jedna je od najvećih njemačkih kompanija koja se bavi izgradnjom termoenergetskih postrojenja te opskrbom energije. Nakon prodaje, program se nastavlja razvijati i proširivati nizom novih mogućnosti.

Kao programski paket, čija je funkcija modeliranje termodinamičkih procesa, *Ebsilon Professional* omogućava izradu shema (Slika 3.1) i simuliranje rada velikog broja kružnih procesa i postrojenja (rashladni strojevi, parno-turbinska postrojenja, plinsko-turbinska postrojenja, kombi postrojenja itd.), a u novijim inačicama programski paket omogućava i simuliranje rada solarnih postrojenja.

Osnovna prednost ovog programa proizlazi iz njegovog grafičkog sučelja, koje omogućava simbolični prikaz elemenata termoenergetskih sustava (turbina, kondenzatora, ventila itd.). Svaki od velikog broja raspoloživih elemenata, sastoji se od skupa naredbi i funkcija (Slika 3.2) koje na temelju zadanih vrijednosti i osnovnih zakona očuvanja mase i energije, proračunavaju tražene vrijednosti pojedinog elementa.

Slika 3.1: Primjer postrojenja u *EBSILON*-u [10]

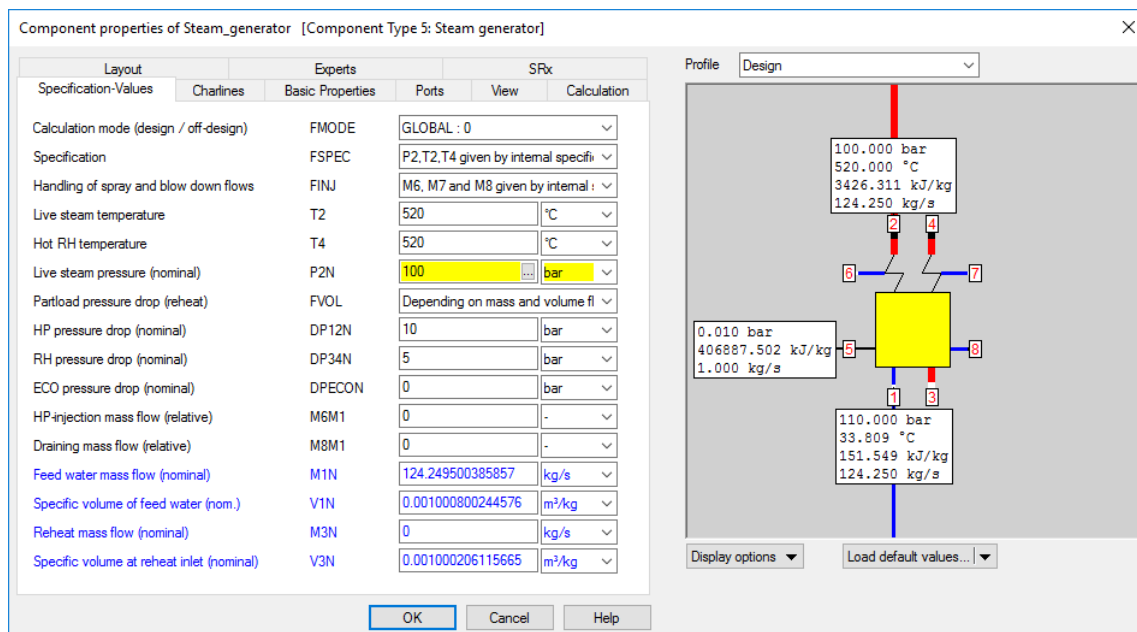
Izabrane simbole, koji reprezentiraju elemente sustava koji želimo prikazati, možemo proizvoljno postaviti na radnu površinu i povezati nizom vodenih, parnih, električnih ili logičkih vodova. U programskom paketu je dostupan i širok izbor armature, regulacijskih i pomoćnih elemenata, koje koristimo za postavljanje i održavanje traženih uvjeta kao i prikazivanje rezultata simulacije i učinkovitosti procesa.

Nakon pravilnog povezivanja komponenti prikladnim vodovima, te zadavanjem početnih uvjeta, moguće je provesti simulaciju sustava, koja se temelji na iterativnom postupku. Temeljem osnovnih jednadžbi sadržanih u kodu svakog elementa, zadanih uvjeta i pristupa širokom rasponu podataka, vezanih uz radne medije sustava, pokretanjem simulacije započinje iteracijski postupak. U svakom koraku iteracije se rješenja karakterističnih jednadžbi elemenata zapisuju u matričnom obliku, te se dobiva matrični zapis linearnog sustava karakterističnih jednadžbi. Program zatim primjenom implicitne *Gauss-Seidel* metode pronalazi konačno rješenje sustava.

Osim jednostavnih operacija koje program izvršava automatski, prilikom računanja, korisnik ima mogućnost provođenja dodatnih operacija korištenjem vlastitog programskog koda. Takvo dodatno kodiranje moguće je korištenjem programskog jezika *EbScript* baziranog na *PASCAL*-u.

EBSILON Professional raspolaže i nizom dodatnih funkcija za prikazivanje rezultata izvršene simulacije. Nudi se mogućnost prikaza rezultata nizom dijagrama (T, q - dijagram, h, s - dijagram, T, s - dijagram, itd.) kao i tablični ispis rezultata. Dodatne mogućnosti uključuju i kompatibilnost s drugim programskim paketima, kao što su *MATLAB* i *Excel*, i to prilikom učitavanja početnih uvjeta te ispisivanja i prikazivanja rezultata simulacije.

Zaključno možemo reći da je *EBSILON Professional* snažan programski paket koji nam pruža sveobuhvatno rješenje prilikom modeliranja, planiranja i projektiranja novih energetskih postrojenja ili kontrole i optimizacije postojećih postrojenja, a sve primjenom relativno intuitivnog grafičkog sučelja.



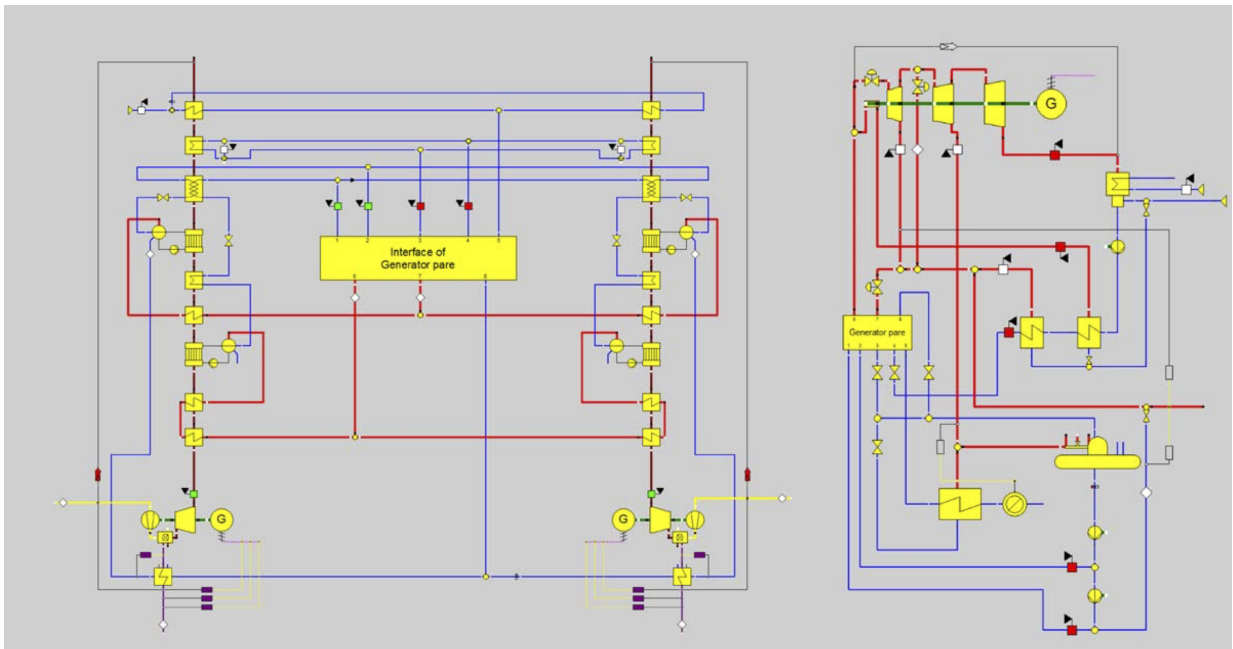
Slika 3.2: Simbolički prikaz generatora pare u *EBSILON*-u

4 Matematički model

Kao što je definirano u tekstu završnog zadatka, u radu je potrebno napraviti matematički model Bloka K, kao dijela *TETO Zagreb*, koristeći programski paket *EBSILON Professional*. Cilj je dobiti model koji što bliže opisuje stvarno stanje postrojenja. Ponašanje modela postrojenja treba biti što sličnije ponašanju stvarnog postrojenja, kako bi se spomenutim modelom moglo provesti simulaciju, koja bi dala uvid u ponašanje sustava u različitim pogonskim uvjetima. Kako bi se što točnije spoznalo na koji način bi se Blok K, ili neki njegov dio, ponašao u različitim režimima rada ili pri promjeni parametara postrojenja, potrebno je osigurati simulaciju koja vrlo precizno opisuje Blok K. S obzirom na to da je Blok K sastavni dio pogona *TETO Zagreb*, njegovo je stalno unaprjeđivanje ključan dio razvoja cjelokupnog postrojenja, a sve kako bi se omogućilo povećanje učinkovitosti proizvodnje i usklađivanje s relevantnim propisima i normama. Upravo iz tog razloga podaci o parametrima rada postrojenja, kao i sheme postrojenja i dijagrami režima rada, dostupni u trenutku pisanja ovog rada, možda neće u potpunosti odgovarati trenutnom stanju i režimu rada postrojenja. Jednom simulirano postrojenje u obliku matematičkog modela napravljenog u *EBSILON* programskom okruženju, pružat će mogućnost prilagodbe bilo kojem režimu rada, uz minimalne preinake postojećeg modela.

4.1. Opis modela

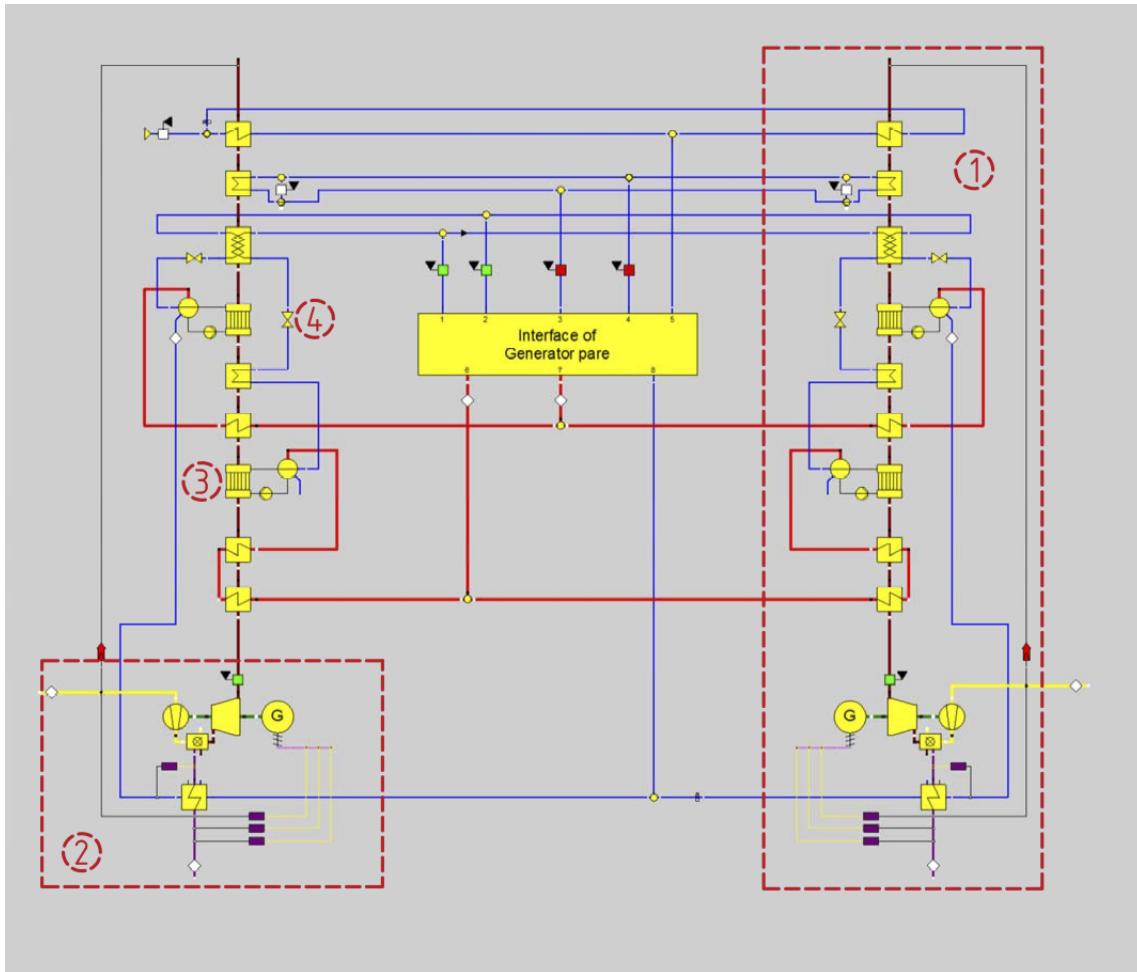
U nadolazećem poglavlju prikazan je izrađeni model Bloka K kojim će se provesti simulacije (Slika 4.1). Objasnit će se pojedini elementi od kojih je model sastavljen, kao i njihova funkcija. Osim osnovnih elemenata Bloka K model se sastoji i od niza pomoćnih elemenata, nužnih za određivanje i održavanje nekih temeljnih parametara.



Slika 4.1: Shema simulacije Bloka K unutar sučelja *EBSILON Professional*

4.1.1. Osnovni elementi modela

Slika 4.1 predstavlja ukupnu shemu modela prikazanu u grafičkom sučelju programa *EBSILON Professional*. Svaki od velikog broja elemenata na slici ne reprezentira samo simbolički prikaz pojedine komponente sustava, nego i skup jednažbi i funkcija koje na temelju dobivenih vrijednosti provode proračun svojstven tipu komponente koji taj element prikazuje.



Slika 4.2: Plinsko-turbinski dio s generatorima pare

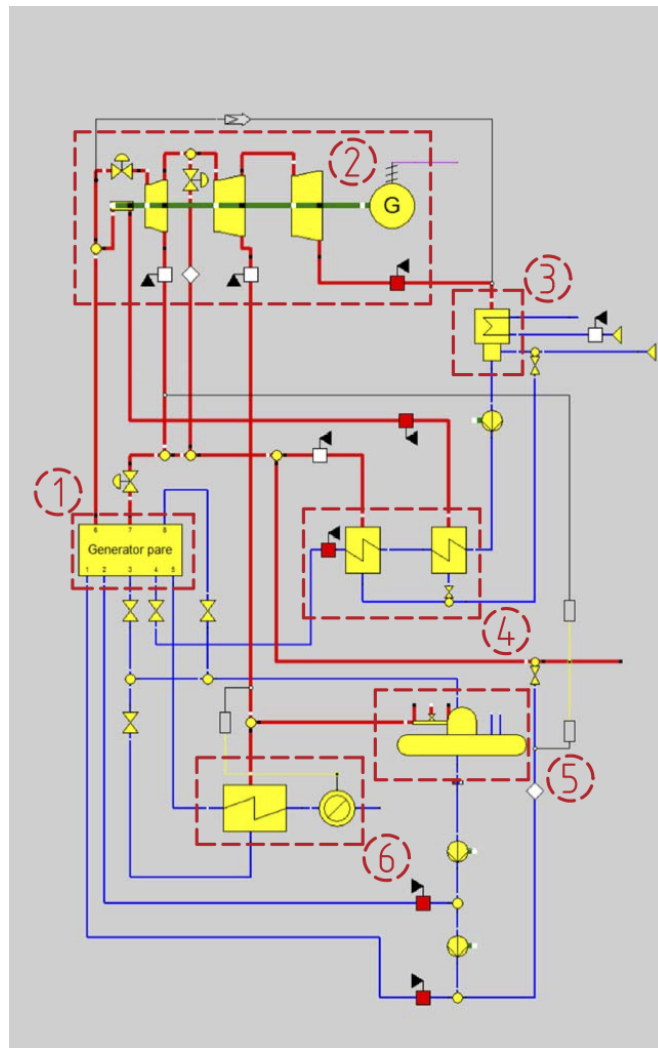
Detaljniji pogled na generatore pare i s njima povezane komponente možemo vidjeti na slici 4.2. Brojem **1** na slici označen je cjeloviti generator pare na otpadnu toplinu ispušnih dimnih plinova, zajedno sa svim pripadajućim izmjenjivačima topline i plinsko-turbinskim dijelom sustava. Blok K sadrži dva identična generatora pare koji iskorištavaju toplinu dimnih plinova na izlazu iz plinskih turbina, a njima proizvedena para se odvodi na parnu turbinu.

Brojem **2** označen je jedan od dva plinsko-turbinska dijela postrojenja. Osnovne komponente plinsko-turbinskog dijela su: kompresor, komora za izgaranje, plinska turbina i električni generator.

Kompresor ima funkciju dovođenja i komprimiranja zraka atmosferskog stanja do stanja zahtijevanog u komori izgaranja. U komori za izgaranje odvija se kemijska reakcija izgaranja dopremljenog goriva, kojom se podiže energetska stanje zraka dovedenog kompresorom te kao produkt izgaranja nastaju dimni plinovi. Gorivo se, prethodno ubacivanju u komoru za izgaranje, predgrijava u zagrijaču goriva vodom, dovedenom izravno iz bubnja niskotlačnog dijela generatora pare, koja se zatim odvodi u otplinjač. Dimni plinovi nastali izgaranjem goriva odvođeni se na plinsku turbinu koja je povezana s električnim generatorom i kompresorom zraka, a sve kako bi se rad potreban za kompresiju zraka dobio izravno od turbine, te ostatak pretvorio u električnu energiju. Dimni plinovi nakon ekspanzije u plinskoj turbini odlaze u prve izmjenjivače generatora pare, tj. dva pregrijača visokotlačne pare. Funkcija pregrijača visokotlačne pare jest povećanje toplinskog stanja visokotlačne pare nakon njenog nastanka u visokotlačnom isparivaču.

Brojem **3** označen je visokotlačni isparivač. Prolaskom dimnih plinova kroz isparivač zagrijava se napojna voda prethodno zagrijana u visokotlačnim ekonomajzerima. Tako nastala visokotlačna para odvodi se na visokotlačne pregrijače pare. Nakon isparivača, dimni plinovi prolaze kroz niskotlačni pregrijač pare, kojim se zagrijava para nastala na niskotlačnom isparivaču generatora pare, a zatim kroz drugi od dva postojeća visokotlačna ekonomajzera.

Dimni plinovi tada prolaze kroz niskotlačni isparivač označen brojem **4**. Njime se napojna voda, predgrijana u niskotlačnom ekonomajzeru, zagrijava i isparava, stvarajući niskotlačnu vodenu paru, koja se zatim zagrijava u niskotlačnom pregrijaču prije odvođenja do parne turbine. Nakon niskotlačnog isparivača, dimni se plinovi iskorištavaju za zagrijavanje napojne vode u duplex izmjenjivaču topline. Duplex izmjenjivač istovremeno djeluje kao ekonomajzer napojne vode za niskotlačni isparivač te kao prvi od dva visokotlačna ekonomajzera. Nakon duplex izmjenjivača, dimni plinovi dolaze do predgrijača kondenzata. Njegova je uloga predgrijavanje kondenzata dovedenog iz kondenzatora, prije ubacivanja tako zagrijanog kondenzata, u otplinjač. Posljednji izmjenjivač iskorištava preostalu toplinu dimnih plinova za zagrijavanje magistralne vode na povratku iz sustava daljinskog grijanja, a prije njenog odvođenja na glavni zagrijač. Dimni se plinovi nakon toga ispuštaju u atmosferu.



Slika 4.3: Parno-turbinski dio s pripadajućim elementima

Slika 4.3 prikazuje parno-turbinski dio Bloka K. Važno je naglasiti da je, radi veće preglednosti i lakšeg snalaženja, čitav plinsko-turbinski dio s generatorima pare, sadržan u bloku nazvanom *Generatori pare* i označenom brojem **1** na spomenutoj slici (Slika 4.3). Svježa visokotlačna para odvodi se na turbinski dio sustava, označen brojem **2**. Prethodno odvođenju na prvi stupanj turbine, mali se dio visokotlačne pare odvaja i koristi za brtvljenje kućišta turbine. Najveći dio visokotlačne pare prolazi stupnjevima parne turbine, uz dva regulirana oduzimanja pare, te se naposljetku odvodi u kondenzator. Niskotlačna se svježa para, ovisno o režimu rada, dijelom može ubaciti u parnu turbinu na određenom stupnju ili miješati s parom oduzetom na prvom (visokotlačnom) oduzi-

manju turbine. Ostatak se niskotlačne pare, u oba slučaja, većim dijelom iskorištava kao industrijska para, a manji dio se odvodi na predgrijač kondenzata. Drugo (niskotlačno) oduzimanje pare na turbini je prvenstveno korišteno za zagrijavanje magistralne vode sustava za daljinsko grijanje u izmjenjivaču, označenom brojem **6**. Taj izmjenjivač koristi paru iz drugog oduzimanja za zagrijavanje, dimnim plinovima već predgrijane vode, do zahtijevane temperature. Višak pare se prije izmjenjivača preusmjerava u otplinjač, a kondenzat na izlazu iz izmjenjivača se također odvodi u otplinjač.

Para se na izlasku iz posljednjeg stupnja parne turbine odvodi u kondenzator označen brojem **3**. Tamo se preostala para, pri kondenzacijskom tlaku, hladi vodom iz rijeke Save. U kondenzator se ubacuje i nadomjesna voda, koja ima funkciju nadoknađivanja vode izgubljene u sustavu. Kondenzat na izlasku iz kondenzatora se zagrijava izmjenjivačima označenim brojem **4**. Prvi od njih za zagrijavanje kondenzata koristi paru preostalu od brtvljenja kućišta turbine, a drugi koristi dio niskotlačne pare. Kondenzirana para iz ovih izmjenjivača se kao kondenzat miješa s nadomjesnom vodom i ubacuje u kondenzator. Glavni kondenzat, zagrijan ovim izmjenjivačima, zatim odlazi na izmjenjivače generatora pare.

Brojem **5** označen je otplinjač. Njegova je osnovna funkcija otklanjanje kisika i ostalih plinova otopljenih u napojnoj vodi, prije odvođenja vode u generatore pare. Naime, otopljeni plinovi, a prvenstveno kisik, mogu izazvati oštećenja i oksidaciju stijenci sustava. Nakon otklanjanja plinova, napojna se voda visokotlačnim i niskotlačnim vodovima odvodi u generatore pare.

Naravno, do sada nabrojeni elementi, ne predstavljaju jedine elemente sustava. Postoji niz pomoćnih i regulacijskih elemenata, prigušnih ventila, kontrolera i vodova, koji su nužni za ispravan rad sustava, ali u ovom radu nisu interesantni za detaljnu analizu.

4.1.2. Simulirani režimi rada

S obzirom na dostupnost dokumentacije, bilo je moguće simulirati i provjeriti rad postrojenja u tri režima. Bitno je naglasiti da u sva tri navedena režima, obje plinske turbine postrojenja na električnom generatoru proizvode nazivnih 71,265 MW_e. Upravo

je zbog toga toplinsko stanje dimnih plinova, proizvedenih u komori izgaranja, nakon izlaska iz plinske turbine, jednako u sva tri slučaja. U spomenutim režimima rada sustav proizvodi:

- $2 \times 71,265 \text{ MW}_e$ na generatorima plinskih turbina, $40,7 \text{ MW}_e$ na generatoru parne turbine, 30 MW_t za potrebe grijanja i 140 t/h industrijske pare temperature 240°C
- $2 \times 71,265 \text{ MW}_e$ na generatorima plinskih turbina, $59,8 \text{ MW}_e$ na generatoru parne turbine, 80 MW_t za potrebe grijanja bez proizvodnje industrijske pare
- $2 \times 71,265 \text{ MW}_e$ na generatorima plinskih turbina, $63,8 \text{ MW}_e$ na generatoru parne turbine, 30 MW_t za potrebe grijanja i 30 t/h industrijske pare temperature 240°C

Svaki od navedenih režima je, nakon postizanja traženih vrijednosti svih promatranih parametara, prozvan nazivnim stanjem sustava za taj režim. Takvo je stanje postignuto uz 100%-tno djelovanje plinsko-turbinskog dijela postrojenja i postizanje nazivne snage od $71,265 \text{ MW}_e$, na oba generatora plinskih turbina. Unutar programskog paketa *EBSILON Professional* tim stanjem je određen takozvani *design mode* za promatrani režim rada.

4.2. *Design mode i Off-design mode*

EBSILON Professional nam pruža mogućnost računanja traženih vrijednosti simuliranog sustava u dva osnovna globalna načina rada, a to su *design mode* i *off-design mode*.

Design mode podrazumijeva kalkulaciju vrijednosti sustava uz pretpostavku punog opterećenja sustava (eng. *full load*). Ovaj se način rada koristi za izradu novih sustava, kao prvi korak daljnjih simulacija. Za svaku komponentu (element sustava) potrebno je definirati poznate vrijednosti parametara i specifikacije, dostupne od proizvođača komponenti. Vrijednosti dobivene na kraju provedene simulacije u *design mode*-u, pohranjuju se unutar komponenti kao nominalne vrijednosti i koriste se kao referentne vrijednosti za proračun unutar *off-design mode*-a.

Off-design mode podrazumijeva kalkulaciju vrijednosti sustava uz pretpostavku djelomičnog opterećenja sustava (eng. *part load*). U okruženju *EBSILON professional* ovaj način rada generira novi profil unutar postojeće simulacije, koji održava jednak raspored i interakciju elemenata, kao u *design mode*-u. To nam omogućuje provođenje nove simulacije pri različitim uvjetima na istom sustavu, bez potrebe za promjenom početne simulacije. *Off-design* nam, primjerice, omogućuje promatranje ponašanja sustava pri 80%-tnom opterećenju. Vrijednosti koje ostaju nepromijenjene u odnosu na *design mode*, izravno se preuzimaju, dok se ostale promijenjene vrijednosti računaju iterativno, na temelju njihovih referentnih vrijednosti iz *design mode*-a. Veza između vrijednosti *design* i *off-design mode*-a, određena je nizom karakterističnih linija i transformacijskih zakona, generiranih unutar programa za svaku od korištenih komponenti.

4.3. Stodolin zakon

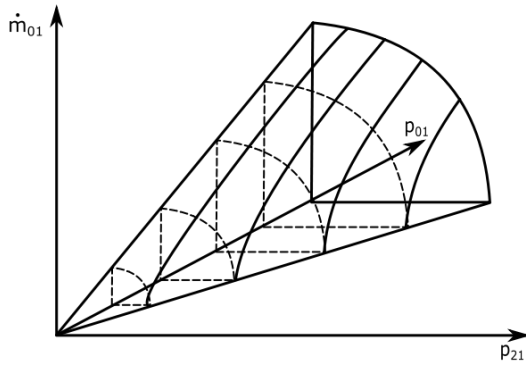
Jedan od interesantnijih primjera proračuna za djelomično opterećenje (*off-design mode*) možemo vidjeti na primjeru parne turbine. Komponenta programskog paketa *EBSILON Professional*, koja predstavlja parnu turbinu, definira vezu između nominalnih vrijednosti iz *design mode*-a i traženih vrijednosti *off-design mode*-a, na temelju karakterističnih linija određenih *Stodolinim zakonom*.

Slovački inženjer Aurel Stodola (1859.-1942.) promatrao je odnos protoka pare kroz stupnjeve parne turbine i tlaka oduzimanja pare s turbine. Uspješno je formuirao takozvani *Stodolin zakon konusa* ili *Zakon elipse*, koji definira krajnje nelinearan odnos promjene protoka pare, u ovisnosti o nekom protutlaku oduzimanja pare na turbini. [17] *Stodolin zakon konusa* postavlja temelj proračuna višestupanjske turbine pri djelomičnom opterećenju ili prilikom promjene masenog protoka oduzimanja.

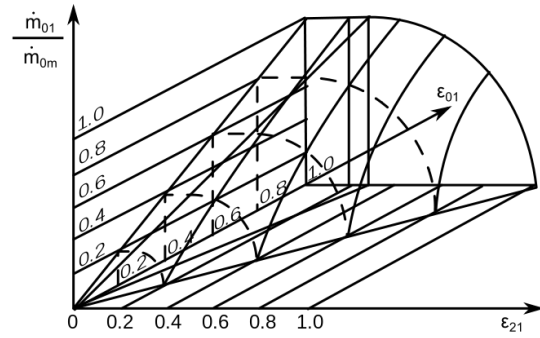
Promatramo li tako višestupanjsku parnu turbinu u radu pri punom nazivnom opterećenju (*design*), proračun se provodi za neki nazivni maseni protok pare \dot{m}_0 , uz odgovarajuću temperaturu T_0 i tlak p_0 na ulazu u turbinu te tlak oduzimanja pare p_2 . Prilikom proračuna uz neko djelomično opterećenje turbine (*off-design*), govorimo o masenom protoku \dot{m}_{01} različitom od nazivnog,

te odgovarajućoj temperaturi T_{01} i tlaku p_{01} , kao i tlaku oduzimanja p_{21} .

Stodola uspostavlja odnos navedenih parametara, koji je moguće prikazati konusom u *Kartezijevom* koordinatnom sustavu (Slika 4.4). Postavimo li na apscisu tlak p_{21} , a na ordinatu maseni protok \dot{m}_{01} , moguće je za neki konstantni tlak pare na ulasku u turbinu p_{01} , pri smanjenom opterećenju, prikazati vezu između protoka m_{01} i tlaka p_{21} . Ta je veza opisana lukom elipse u ravnini paralelnoj s osima \dot{m}_{01} i p_{21} .



Slika 4.4: Prikaz *Stodolinog konusa* [11]



Slika 4.5: Omjer vrijednosti na osima [12]

Na koordinatne osi je moguće nanijeti omjer vrijednosti tlakova i protoka te njihovih maksimalnih, nazivnih, vrijednosti (Slika 4.5). Ti su omjeri zapisani izrazima:

$$\varepsilon_0 = \frac{p_0}{p_{0m}} \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{p_2}{p_{2m}} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{01} = \frac{p_{01}}{p_{0m}} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{21} = \frac{p_{21}}{p_{2m}} \quad (4.4)$$

Analitički izraz *Stodolinog zakona konusa* sa slike (Slika 4.5) možemo formulirati:

$$\frac{\dot{m}_0}{\dot{m}_{01}} = \sqrt{\frac{T_{01}}{T_0}} \sqrt{\frac{\varepsilon_0^2 - \varepsilon_2^2}{\varepsilon_{01}^2 - \varepsilon_{21}^2}} \quad (4.5)$$

Relacija (4.5) predstavlja vezu između protoka kroz turbinu pri potpunom i djelomičnom opterećenju turbine. Koristi se unutar programskog paketa *EBSILON Professional* za određivanje tlakova oduzimanja pare na turbini, pri promjeni protoka pare na ulazu u turbinu u *off-design mode*-u. Program poznate tlakove odvođenja, izračunate za nazivni protok pare u *design mode*-u, iskorištava kako bi preko navedene relacije, dobio tlakove odvođenja za smanjeni protok u *off-design mode*-u.

5 Rezultati

U prethodnom je poglavlju (Poglavljje 4.1.2.) već spomenuto kako su, na temelju dostupnih podataka, izabrana tri režima rada *TETO Zagreb*, za simulaciju unutar programskog paketa *EBSILON Professional*. Za svaki od navedenih režima rada, postignute su tražene vrijednosti, te su iste uspoređene s dostupnim podacima o postrojenju. Za sve relevantne vrijednosti je utvrđeno da, bez većih odstupanja, odgovaraju dostupnim podacima o radu svakog od režima. Naravno, izvršene simulacije ne mogu u potpunosti točno opisati realno stanje sustava, i to u prvom redu iz razloga što, prilikom postavljanja simulacije, nije bilo moguće doći do svih aktualnih informacija o nekim parametrima sustava. Unatoč spomenutom, simulacija dovoljno točno prikazuje tražena stanja, te omogućuje prikaz niza rezultata interesantnih za promatranje. Potrebno je naglasiti da je model izrađen tako da se održava konstantan iznos izlazne snage na električnom generatoru plinske turbine. Takvo ponašanje sustava, uz primjenu istog tipa turbine, nije realno te će u stvarnosti, promjenom vanjskih parametara, doći do promjene snage na električnom generatoru plinske turbine i drugačije promjene nekih parametara, nego što li je prikazano ovoj simulaciji.

5.1. Utjecaj promjene parametara atmosferskog zraka

Kao kod svih kombiniranih kogeneracijskih postrojenja, tako će i u slučaju rada *TETO Zagreb*, kombinirana proizvodnja industrijske pare, električne i toplinske energije prvenstveno ovisiti o radu plinsko-turbinskog dijela pogona. Zahtjev za proizvodnjom električne energije na generatorima plinskih turbina izravno utječe na produkciju

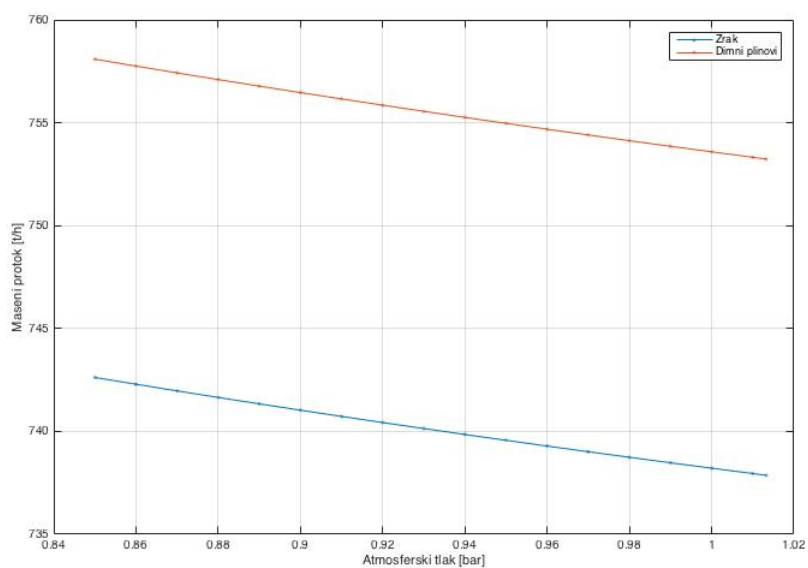
pare. Definiranjem tražene proizvodnje električne energije plinsko-turbinskog generatora, određujemo parametre rada kompresora zraka, komore izgaranja i plinske turbine. Time se određuju i parametri dimnih plinova, koji napuštaju plinsku turbinu i odlaze u generatore pare. Maseni protok i temperatura dimnih plinova na izlasku iz plinske turbine definiraju toplinsku energiju, koja nam je na raspolaganju za zagrijavanje vode i produkciju pare u generatorima pare. [18] Viši parametri rada plinsko-turbinskog dijela rezultiraju višim parametrima dimnih plinova, te omogućuju veću produkciju pare. Naravno, veća produkcija pare viših parametara omogućuje i povećanu produkciju električne i toplinske energije parno-turbinskog dijela postrojenja.

U svim simuliranim režimima rada, zahtjev za proizvodnjom električne energije na plinsko-turbinskom generatoru, jednak je za nazivno stanje (puno opterećenje) i iznosi 71,265 MW_e. Osim toga, sustav je reguliran na način da se želi zadržati približno konstantna temperatura dimnih plinova na izlazu plinske turbine (594°C). Za spomenute uvjete konstantne proizvodnje električne energije te konstantne izlazne temperature dimnih plinova, najveći će utjecaj na promjenu protoka dimnih plinova, a time i produkciju pare, imati stanje vanjskog zraka na ulazu u kompresor.

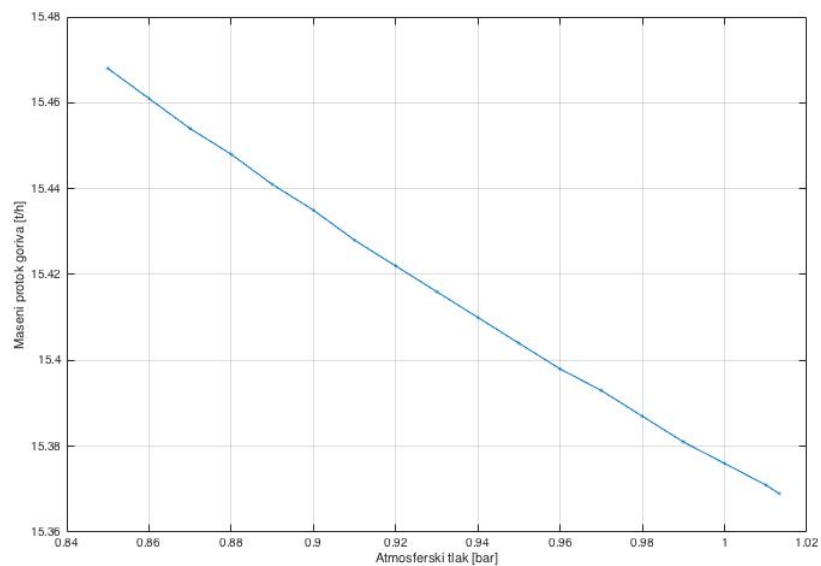
Za nazivno opterećenje sustava, u svim režimima rada, korišteno je jednako stanje atmosferskog zraka. Uzeta je temperatura vanjskog zraka od 15°C, pri atmosferskom tlaku od 1,01 bar i relativnoj vlažnosti zraka od 60%. Ipak, interesantno je promatrati kako će se promjena navedenih vrijednosti odraziti na rezultate simulacije.

5.1.1. Promjena atmosferskog tlaka

S obzirom na to da nije moguće promatrati istovremenu promjenu svih navedenih parametara stanja atmosferskog zraka, promatrat ćemo promjenu jednog parametra, dok ćemo ostale držati konstantnim. Prilikom promatranja utjecaja promjene atmosferskog tlaka na rad plinsko-turbinskog dijela postrojenja, držat ćemo konstantnu temperaturu vanjskog zraka od 15°C i konstantnu relativnu vlažnost od 60%.



Slika 5.1: Promjena masenog protoka zraka i dimnih plinova s promjenom atmosferskog tlaka



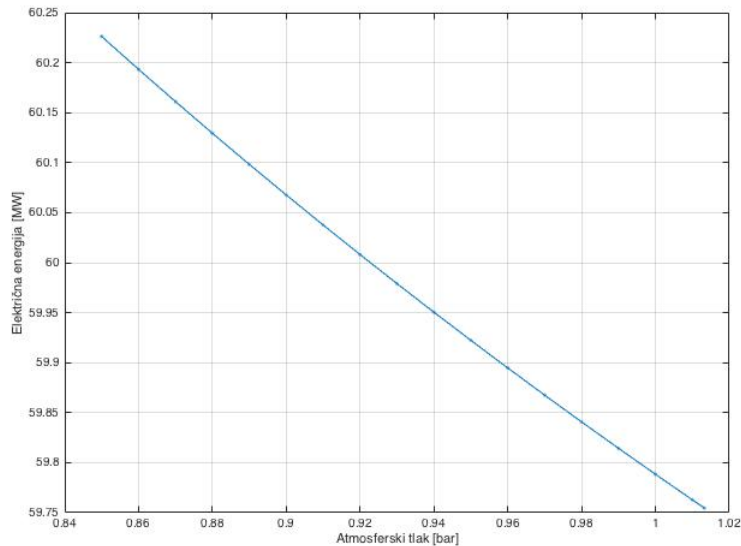
Slika 5.2: Promjena masenog protoka goriva s promjenom atmosferskog tlaka

Dijagram (Slika 5.1) prikazuje ovisnost promjene masenog protoka zraka, koji se kompresorom dovodi u komoru izgaranja, te masenog protoka nastalih dimnih plinova, u ovisnosti o promjeni atmosferskog tlaka. Praćena je promjena tlaka od 0,85 bar do 1,01325 bar. Možemo uočiti da se povećanje atmosferskog tlaka manifestira smanjenjem potrebnih masenih protoka zraka i protoka goriva (Slika 5.2), koji se trebaju dovesti u komoru izgaranja. Potrebno je naglasiti, a što je vidljivo i iz priloženih dijagrama, da je smanjenje masenog protoka goriva puno manje nego smanjenje protoka zraka dimnih plinova.

U općem slučaju, povećanje atmosferskog tlaka, uz konstantan volumen sustava, dovelo bi do povećanja masenog protoka zraka, a time i nastalih dimnih plinova, te do smanjenja snage potrebne za kompresiju zraka. [19] To bi dovelo do povećanja raspoložive snage turbine te snage električnog generatora. S obzirom na to da u našem slučaju želimo zadržati konstantnu snagu na električnom generatoru, povećanjem atmosferskog tlaka, sustav zahtjeva manji maseni protok zraka, a time producira manje dimnih plinova.

Smanjena će se produkcija dimnih plinova odraziti i na parno-turbinski dio postrojenja. Kao što je već objašnjeno, produkcija dimnih plinova usko je povezana s produkcijom pare u generatorima pare. Smanjeni protok dimnih plinova, uz istu polaznu temperaturu, značit će manju produkciju visokotlačne i niskotlačne vodene pare, koju je moguće odvesti na parnu turbinu i iskoristiti za proizvodnju električne i toplinske energije.

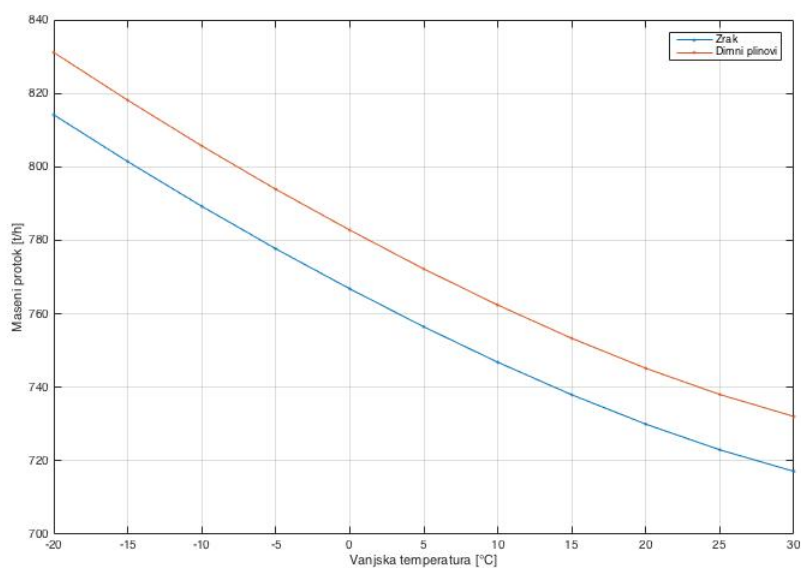
Dijagram (Slika 5.3) prikazuje kako promjena atmosferskog tlaka utječe na proizvodnju električne energije na generatoru parne turbine. Prikazana promjena ostvarena je uz nazivno opterećenje plinskih turbina i održavanje željenih parametara proizvodnje toplinske energije (80 MW_t), za režim rada u kojem nema produkcije industrijske pare. Jasno je vidljivo da smanjena produkcija pare, izazvana porastom atmosferskog tlaka, dovodi do blagog pada proizvodnje električne energije na parnoj turbini.



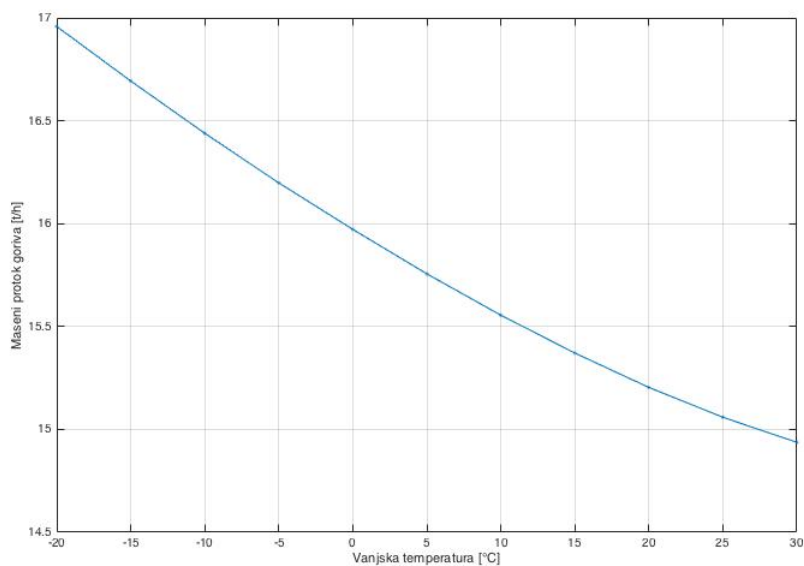
Slika 5.3: Promjena proizvodnje električne energije na parnoj turbini s promjenom atmosferskog tlaka

5.1.2. Promjena temperature vanjskog zraka

Prilikom promatranja utjecaja promjene temperature vanjskog zraka na rad plinsko-turbinskog i parno-turbinskog dijela postrojenja, održavat ćemo konstantan atmosferski tlak zraka od 1,01 bar i konstantnu relativnu vlažnost od 60%. Iz dijagrama (Slika 5.4) možemo uočiti da promjena vanjske temperature zraka ima značajniji utjecaj na promjenu masenog protoka zraka i dimnih plinova, nego što je bio slučaj kod promjene atmosferskog tlaka. Možemo uočiti da porast temperatura izaziva smanjenje masenog protoka zraka na ulazu u kompresor, a time izravno izaziva smanjenje produkcije dimnih plinova. Općenito, povećanjem temperature vanjskog zraka, uz konstantne ostale parametre, smanjuje se gustoća zraka koji ulazi u kompresor, a time i maseni protok istog. Dolazi do smanjenja snage, potrebne za pogon kompresora, a to znači da je potrebno dovesti manje goriva u komoru za izgaranje, kako bi se održala željena snaga na plinskoj turbini. Smanjena potreba za potrošnjom goriva izraženija je nego kod promjene atmosferskog tlaka (Slika 5.5). Potrebno je naglasiti kako u ovoj simulaciji održavamo konstantnu snagu plinskih turbina, dok ćemo u stvarnosti konstantnu snagu moći održati samo prilikom smanjenja temperature vanjskog zraka, uz jednake rubne uvjete.



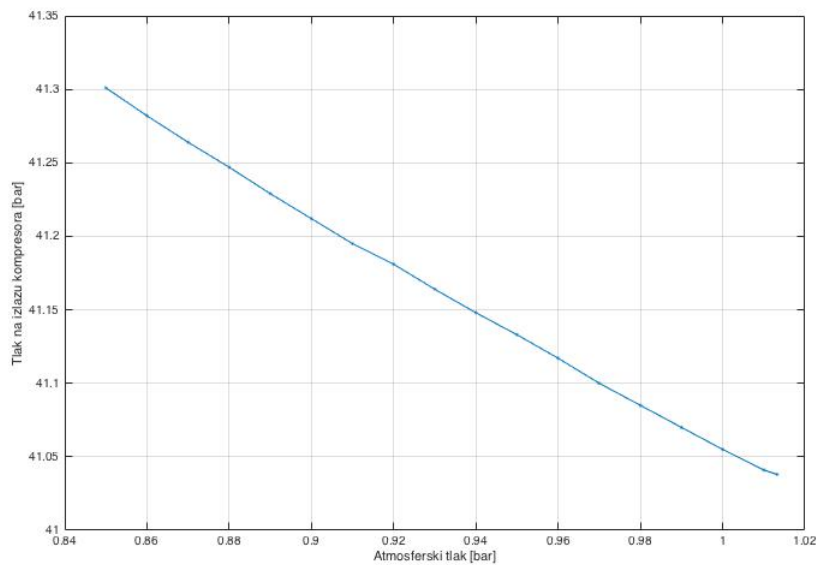
Slika 5.4: Promjena masenog protoka zraka i dimnih plinova s promjenom temperature vanjskog zraka



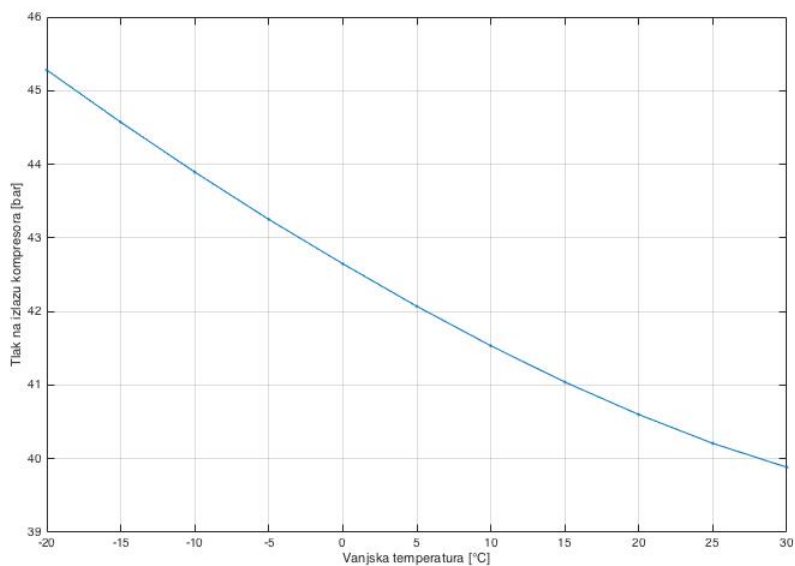
Slika 5.5: Promjena masenog protoka goriva s promjenom temperature vanjskog zraka

Za razliku od prethodnog poglavlja gdje se promjena atmosferskog tlaka nije očitovala značajnom promjenom tlaka na izlazu kompresora (Slika 5.6), u ovom slučaju, povećanje temperature zraka na ulazu u kompresor dovodi i do značajnijeg smanjenja tlaka na izlazu iz kompresora (Slika 5.7). S obzirom na to da tlak na izlazu iz kompresora izravno ovisi o masenom protoku, porastom masenog protoka zraka doći će do porast tlaka.

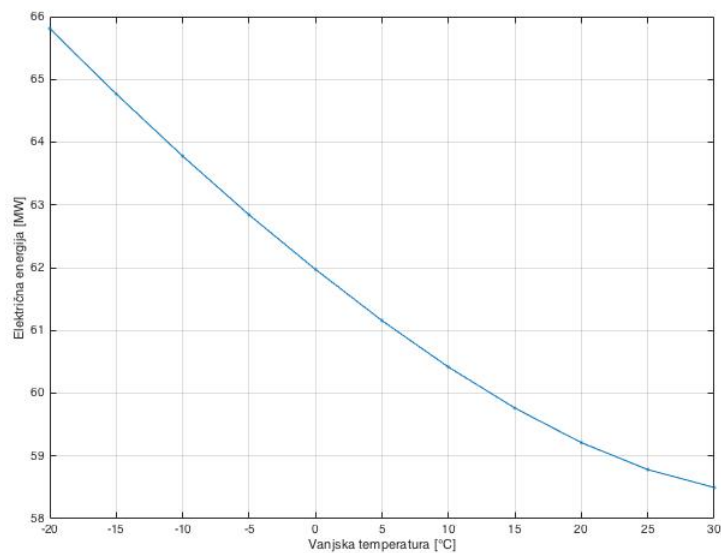
Prema već objašnjenom principu, smanjenje produciranih dimnih plinova očituje se i smanjenjem raspoložive topline u generatorima pare, te tako smanjenjem produkcije vodene pare traženih parametara. Manja količina pare koristi se za postizanje zadanih parametara proizvodnje toplinske energije (80 MW_t bez proizvodnje industrijske pare), a ostatak se koristi za proizvodnju električne energije na generatoru parne turbine.



Slika 5.6: Promjena izlaznog tlaka kompresora s promjenom atmosferskog tlaka

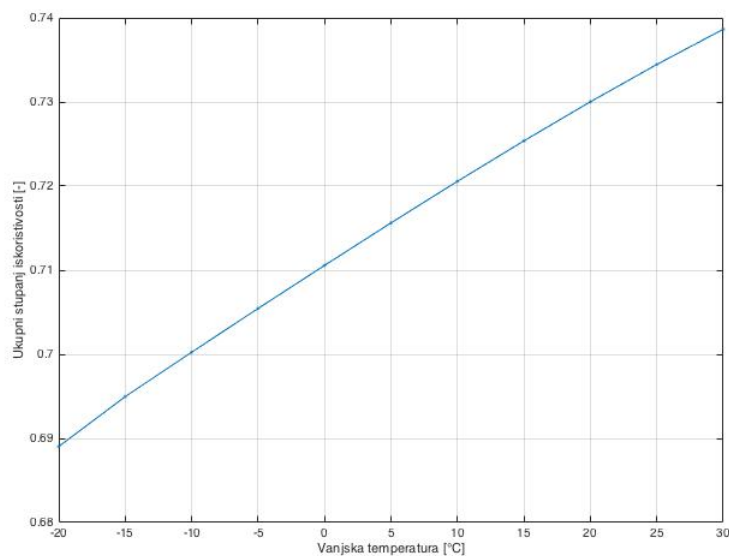


Slika 5.7: Promjena izlaznog tlaka kompresora s promjenom temperature vanjskog zraka



Slika 5.8: Promjena proizvodnje električne energije na parnoj turbini s promjenom temperature vanjskog zraka

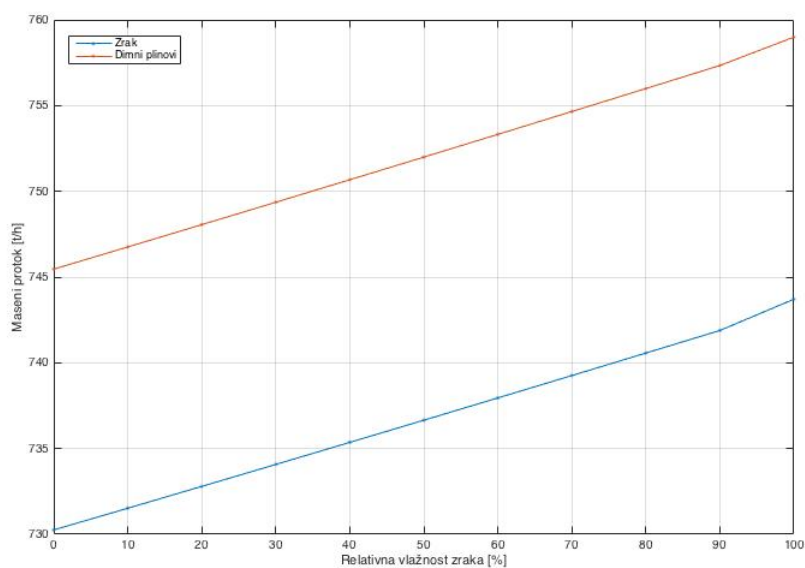
Prema gore prikazanom dijagramu (Slika 5.8), možemo uočiti značajniji utjecaj promjene temperature vanjskog zraka na snagu električnog generatora parne turbine. I ovdje smo promatrali rad postrojenja za konstantnu snagu generatora plinskih turbina. S obzirom na značajniju promjenu snage na parno-turbinskim generatorima, ona se manifestira i uočljivom promjenom ukupnog stupnja djelovanja čitavog procesa (Slika 5.9).



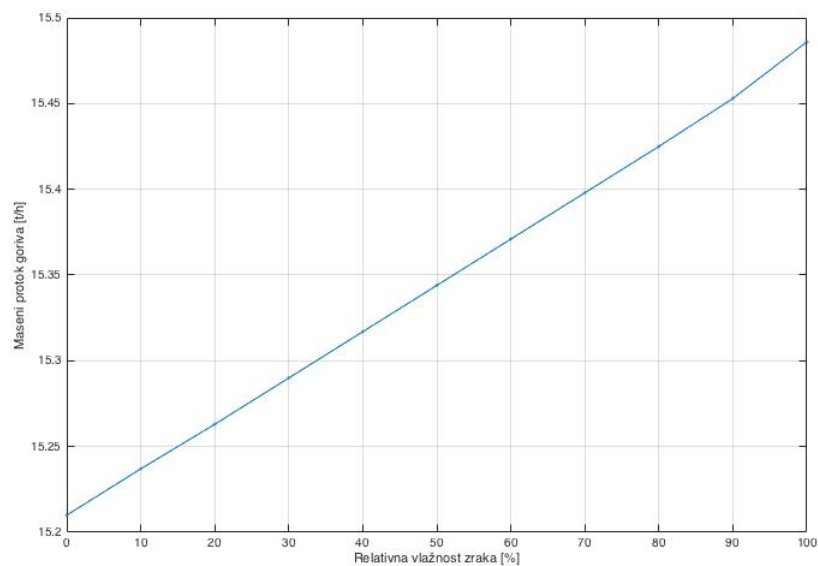
Slika 5.9: Promjena ukupnog stupnja iskoristivosti s promjenom temperature vanjskog zraka

5.1.3. Promjena relativne vlažnosti vanjskog zraka

Kako bismo uspješno promatrali utjecaj promjene relativne vlažnosti zraka na parametre rada plinsko-turbinskog i parno-turbinskog dijela postrojenja, ponovno je potrebno ostale parametre vanjskog zraka držati konstantnima. Tako ćemo za temperaturu vanjskog zraka uzeti 15°C, a za atmosferski tlak 1,01 bar.



Slika 5.10: Promjena masenog protoka zraka i dimnih plinova s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka

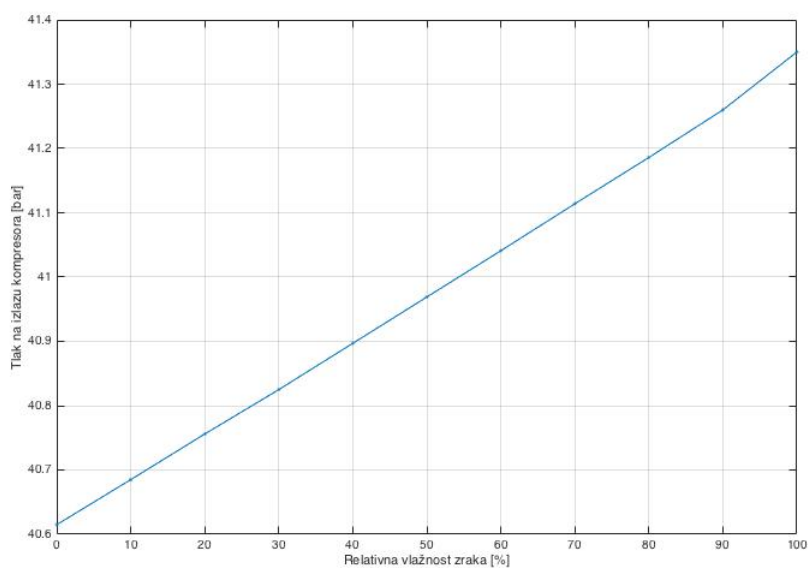


Slika 5.11: Promjena masenog protoka goriva s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka

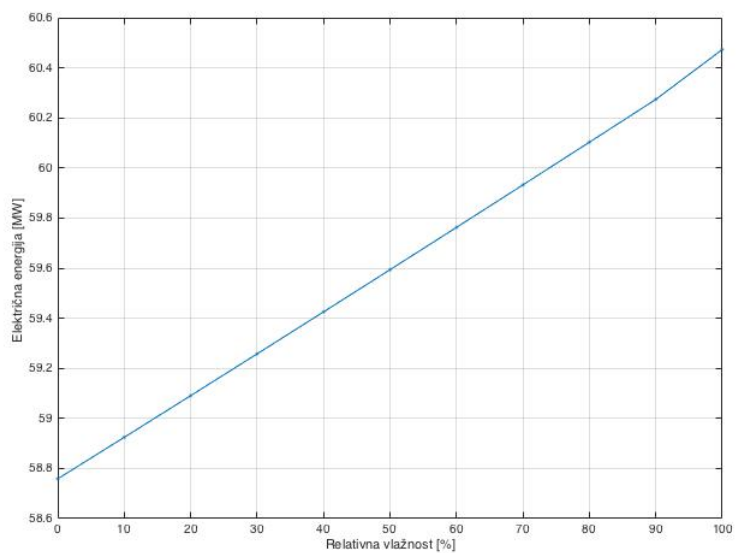
Primjećujemo da povećanjem relativne vlažnosti zraka dolazi do povećanja masenog protoka, zraka potrebnog na ulazu u kompresor i do povećanja produkcije dimnih plinova na izlazu, kako bi snaga plinske turbine ostala konstantna. Naime, zrak veće relativne vlažnosti manje je gustoće u odnosu na suhi zrak. [14] To znači da ćemo povećanjem relativne vlažnosti vanjskog zraka na ulazu u kompresor, imati zrak s većim sadržajem vodene pare. Upravo radi toga, potrebno je dovoditi veću količinu zraka u komoru izgaranja, što će rezultirati i većom produkcijom dimnih plinova (Slika 5.10). Također, uočavamo i blagi porast potrošnje goriva u komori izgaranja (Slika 5.11).

Zrak veće relativne vlažnosti je manje gustoće u odnosu na suhi zrak. Povećanjem relativne vlažnosti zraka, smanjit će se snaga potrebna za pogon kompresora. Prema dijagramu (Slika 5.12) je vidljivo da je tlak zraka na izlazu iz kompresora tek malo veći, povećanjem relativne vlažnosti. Do spomenutog povećanja tlaka na izlazu iz kompresora dolazi zbog povećanja masenog protoka zraka.

Kao i u prethodnim slučajevima, tako se i u ovom slučaju može uočiti, da se promjena parametara atmosferskog zraka odražava i na parno-turbinsko dio postrojenja. Promjenu smo pratili u režimu rada bez proizvodnje industrijske pare i uz potrebu za 80 MW_t energije uz konstantno opterećenje plinskih turbina. S obzirom na to da je ustanovljeno povećanje produkcije dimnih plinova, ono će se, preko generatora pare, odraziti kao povećanje produkcije pare. Navedena će se promjena u produkciji pare odraziti i na proizvodnju električne energije na generatoru parne turbine, dok promjena stupnja djelovanja sustava neće biti značajna. (Slika 5.13)



Slika 5.12: Promjena izlaznog tlaka kompresora s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka



Slika 5.13: Promjena proizvodnje električne energije na parnoj turbini s promjenom relativne vlažnosti vanjskog zraka

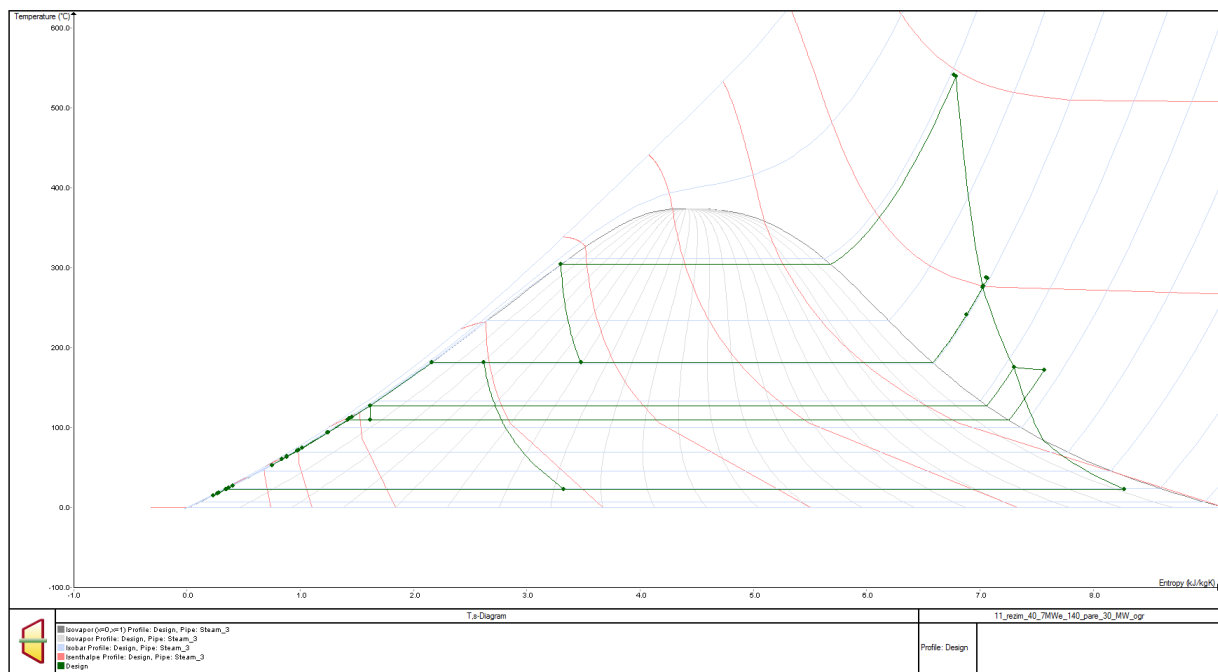
5.2. *Design i off-design mode* pojedinih režima rada

Sve do sada prikazane i objašnjene promjene parametara sustava i njihov odraz na rezultate simulacije, prikazani su uz nazivno opterećenje plinskih turbina, i to samo za jedan režim rada *TETO Zagreb*. Prikaz rezultata samo jednog režima rada, dovoljan je za razumijevanje utjecaja promjene parametara atmosferskog zraka na rad sustava, budući da će se i u drugim režimima rada uočiti slično ponašanje sustava. Interesantno je promatrati ponašanje sustava u sva tri simulirana režima rada. Za svaki od režima, promatrat ćemo ponašanje sustava u T, s i h, s – dijagramu, za nazivnu proizvodnju električne energije na plinsko-turbinskim generatorima (*design*), kao i uz 80%-tno odnosno 60%-tno opterećenje (*off-design*).

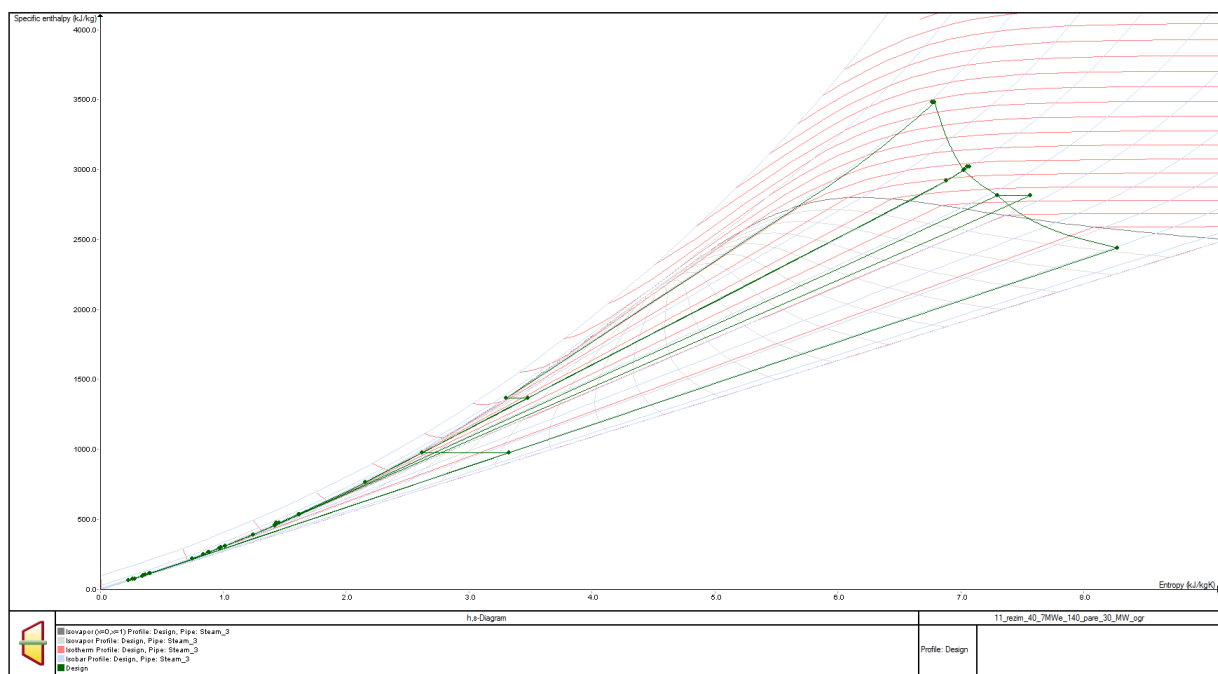
5.2.1. 1. režim rada

U 1. režimu rada, pri nazivnom opterećenju plinsko-turbinskih generatora od 71,265 MWe, producira se 753,32 t/h dimnih plinova temperature 594°C na izlazu obje plinske turbine. Ti se dimni plinovi iskorištavaju u izmjenjivačima i kotlovima generatora pare, za produkciju približno 220,2 t/h visokotlačne pare tlaka 94,9 bar i temperature 540,8°C te 24,3 t/h niskotlačne pare tlaka 10,6 bar i temperature 287,4°C. Producirana para se odvodi na parnu turbinu i ostale komponente parno-turbinskog dijela sustava, što rezultira proizvodnjom 40,76 MWe energije na električnom generatoru parne turbine, 30 MW_t energije za potrebe grijanja i 140 t/h industrijske pare temperature 241,4°C te tlaka 10,3 bar. Ovakvo stanje sustava predstavlja *design mode* stanje za 1. režim rada.

Prikazani dijagrami (Slike 5.14 i 5.15) predstavljaju prikaz rada 1. režima za *design mode*. Interesantno je promatrati kako će se prikaz rada u T, s i h, s - dijagramu promijeniti u *off-design mode*-u rada istog režima.



Slika 5.14: T, s - dijagram procesa za 1. režim rada



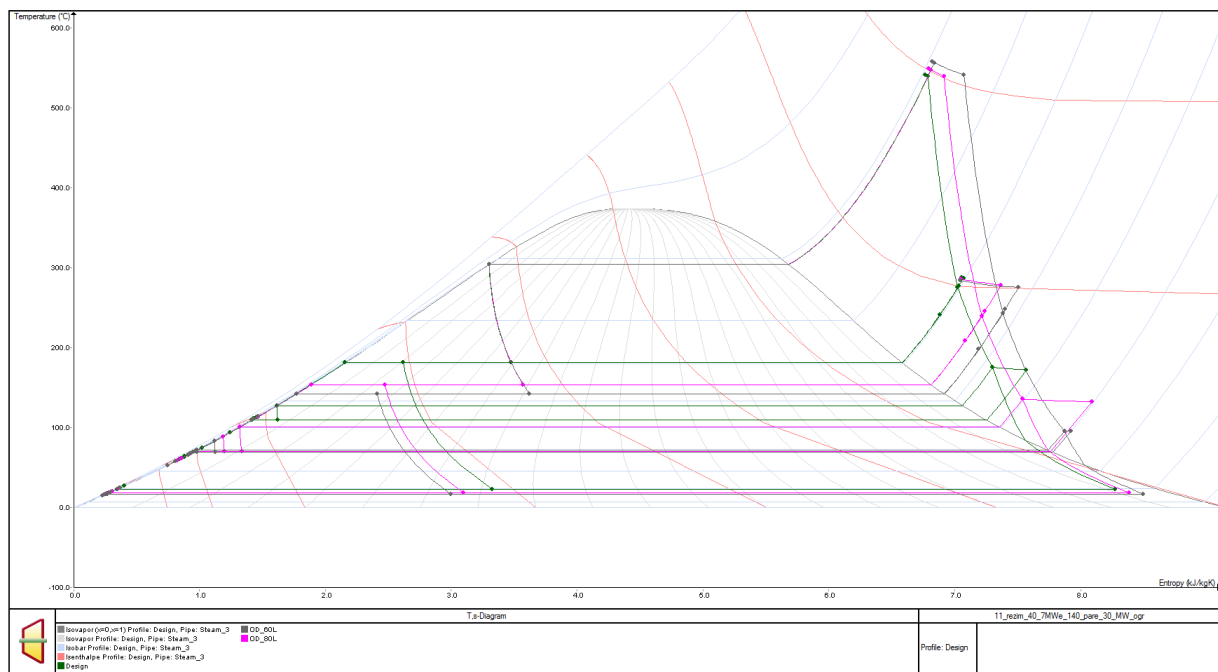
Slika 5.15: h, s - dijagram procesa za 1. režim rada

Promotrimo prvo 80%-tni *off-design mode*, tj. rad sustava u 1. režimu, ali uz 80%-tnu proizvodnju električne energije na plinsko-turbinskim generatorima. Uz takvu smanjenu proizvodnju električne energije na plinskim turbinama od 57,01 MW_e, dolazi i do smanjene proizvodnje dimnih plinova na izlazu iz plinske turbine. Uz zadržavanje temperature od 594°C, proizvodi se samo 596,83 t/h dimnih plinova, što dovodi i do smanjenja produkcije pare. Tako se proizvodi 174 t/h visokotlačne pare temperature 548,8°C i 20,02 t/h niskotlačne pare temperature 285,8°C. Bitno je spomenuti da su tlakovi visokotlačne i niskotlačne pare jednaki u svakom režimu rada, za sva opterećenje (100%-tno, 80%-tno, 60%-tno) te iznose 94,9 bar i 10,6 bar.

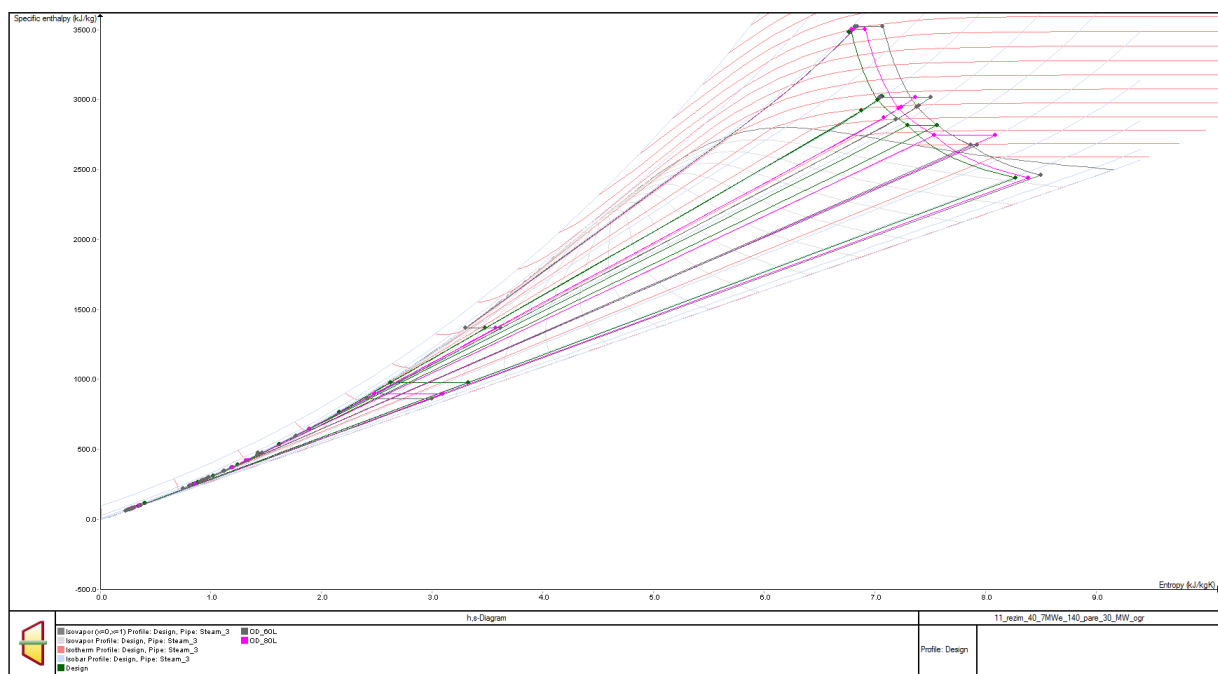
Komponente koje predstavljaju stupnjeve parne turbine u programskom paketu *EBSILON Professional*, na temelju jednadžbe *Stodolinog zakona* (4.5), računaju tlakove izlaza pojedinih stupnjeva, kao i masene protoke, te tlakove pojedinih oduzimanja pare. Sustav je reguliran na način da se primarno održi proizvodnja toplinske energije, za potrebe grijanja u iznosu od 30 MW_e, te ako je moguće, i proizvodnja industrijske pare traženih parametara. Ostatak svježje pare se iskorištava za proizvodnju električne energije na generatoru parne turbine u iznosu od 31,83 MW_e.

Za 60%-tni *off-design mode*, vrijede svi odnosi kao i za 80%-tni *off-design mode*, ali naravno, uz dodatno smanjenje opterećenja generatora električne energije plinskih turbina. Proizvodi se 42,76 MW_e na generatorima plinskih turbina, što rezultira proizvodnjom 443,45 t/h dimnih plinova, temperature 594°C, na izlazu iz plinske turbine. Smanjenjem proizvodnje visokotlačne (128,80 t/h, 558°C) i niskotlačne pare (15,67 t/h, 284,4°C), zadržava se proizvodnja toplinske energije od 30 MW_t, ali uz smanjenje proizvodnje industrijske pare (104,74 t/h, 3,9 bar i 198,7°C). S obzirom na to da nije moguće postići proizvodnju industrijske pare traženih parametara, ona se najčešće uopće neće proizvoditi. Proizvodnja električne energije na parno-turbinskom generatoru iznosi 23,873 MW_e.

Usporedba navedenih načina rada može se prikazati u T, s i h, s - dijagramima. (Slike 5.16 i 5.17)



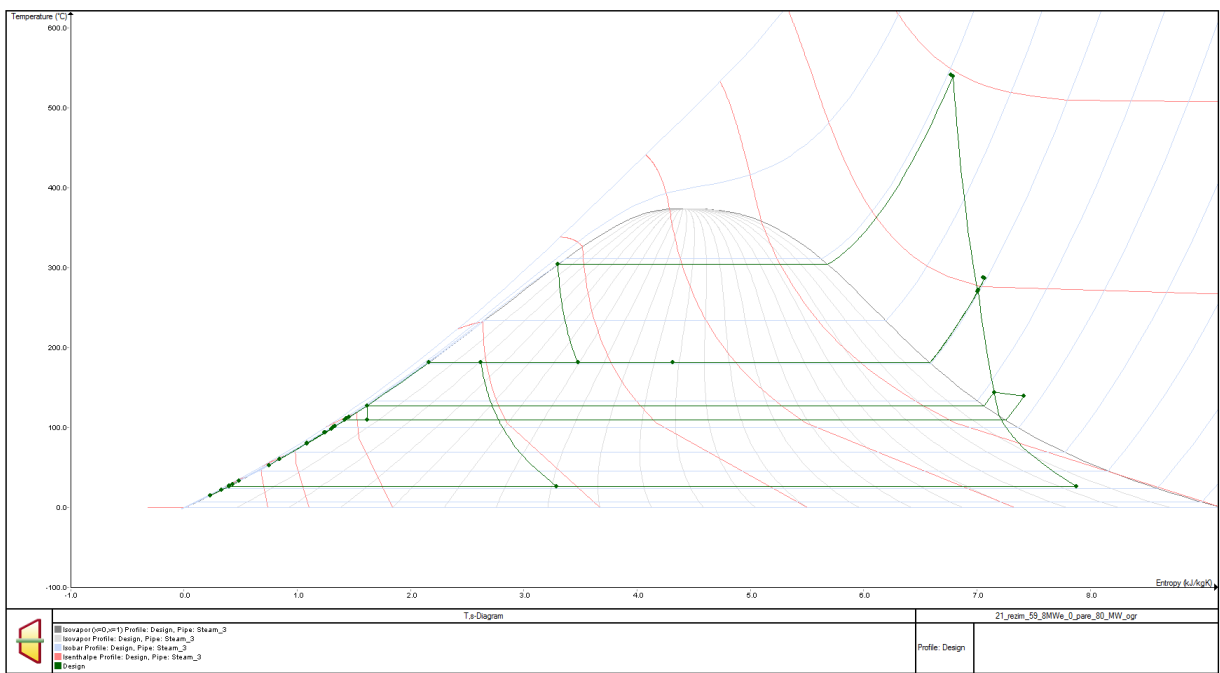
Slika 5.16: T, s - dijagram procesa 1. režima rada za različita opterećenja



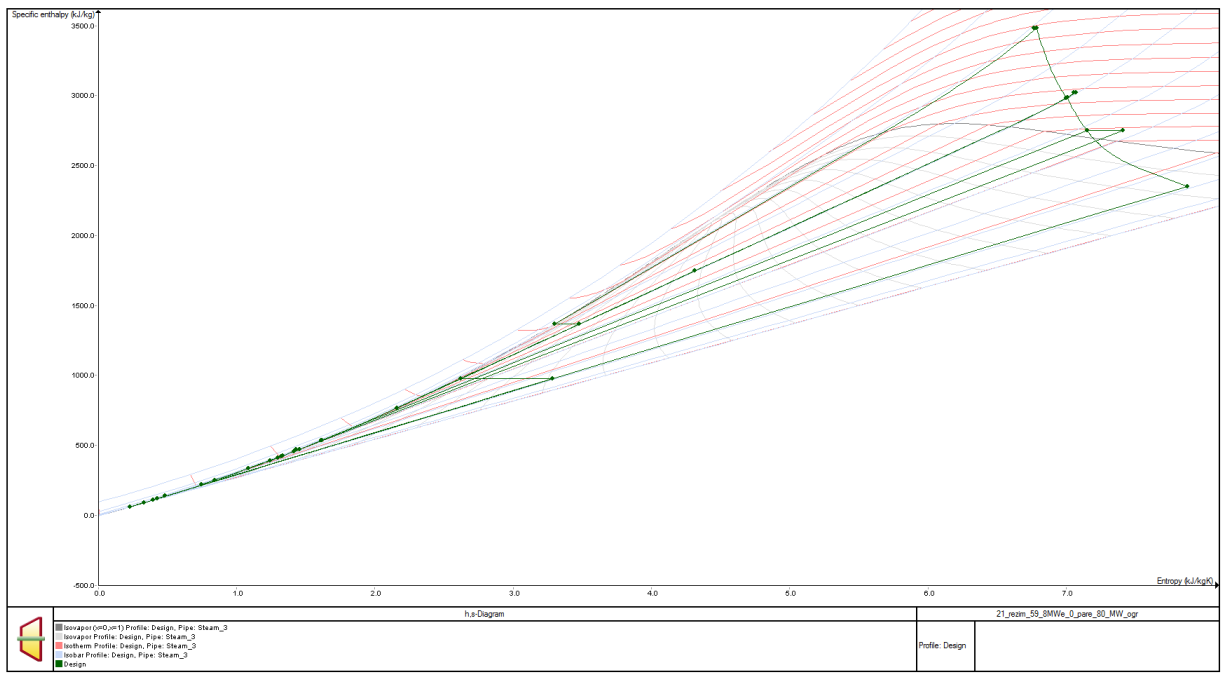
Slika 5.17: h, s - dijagram procesa 1. režima rada za različita opterećenja

5.2.2. 2. režim rada

U 2. režimu rada, pri 100%-tnom opterećenju plinsko-turbinskih generatora od 71,265 MW_e, producira se, kao i u prvom režimu, 753,32 t/h dimnih plinova temperature 594°C na izlazu obje plinske turbine. Ti se dimni plinovi iskorištavaju u izmjenjivačima i kotlovima generatora pare za produkciju približno 220,2 t/h visokotlačne pare tlaka 94,9 bar i temperature 540,8°C te 24,32 t/h niskotlačne pare tlaka 10,6 bar i temperature 287,4°C. Producirana para se odvodi na parnu turbinu i ostale komponente parno-turbinskog dijela sustava, što rezultira proizvodnjom 59,76 MW_e energije na električnom generatoru parne turbine i 80 MW_t toplinske energije, za potrebe grijanja bez potrebe za proizvodnjom industrijske pare. Ovakvo stanje sustava predstavlja *design mode* stanje za 2. režim rada.

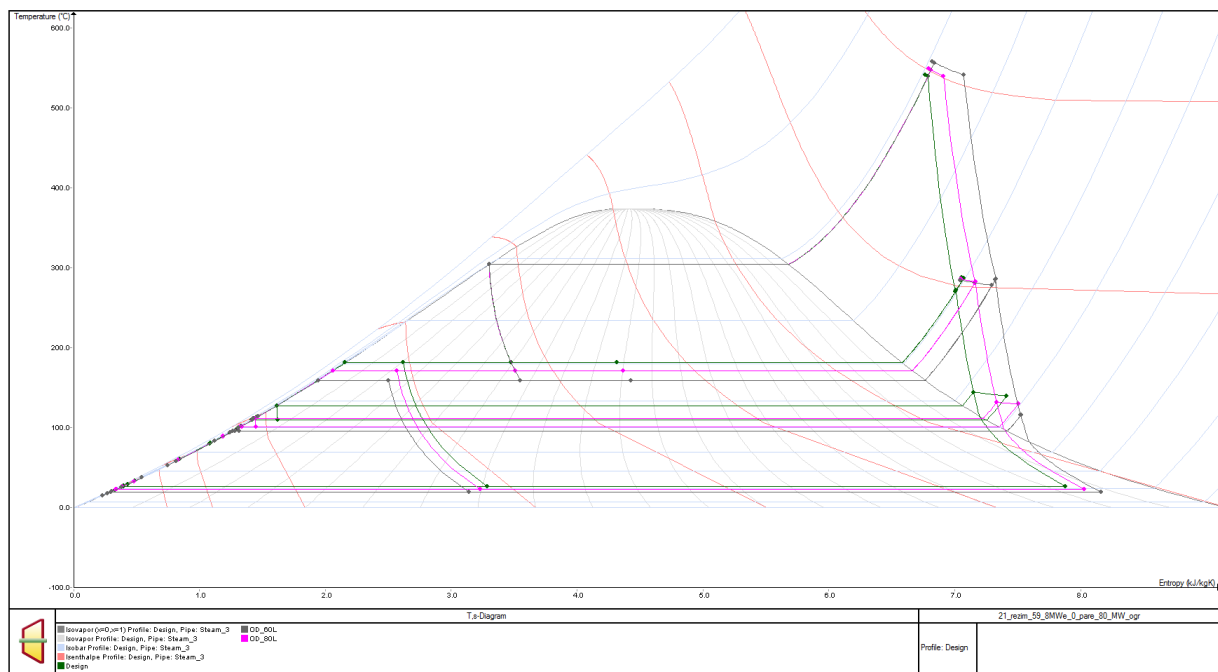


Slika 5.18: T, s - dijagram procesa za 2. režim rada

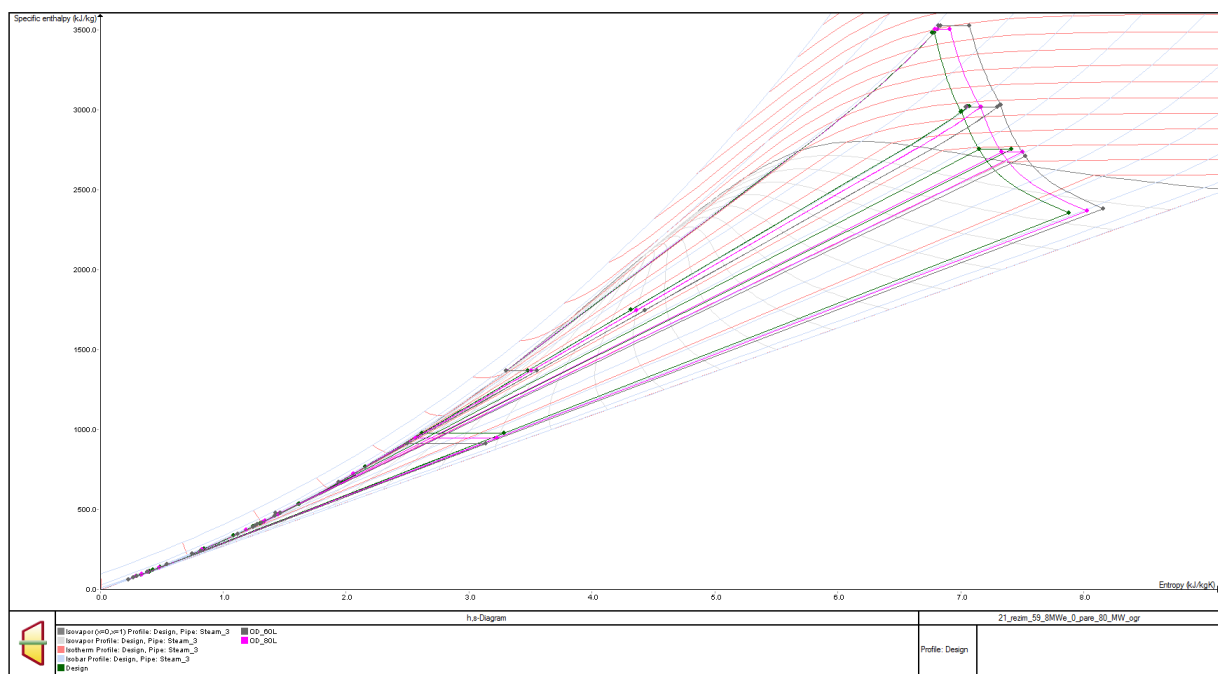


Slika 5.19: h, s - dijagram procesa za 2. režim rada

Dijagrami (Slike 5.18 i 5.19) predstavljaju prikaz rada 2. režima za *design mode*. Potrebno je pokazati kako će se prikaz rada u T, s i h, s - dijagramu promijeniti za *off-design mode* istog režima. (Slike 5.20 i 5.21). Za 80%-tni *off-design mode* 2. režima rada, zadajemo smanjenje opterećenja generatora električne energije plinskih turbina od 80%. Proizvodnja električne energije na plinskim turbinama iznosi 57,01 MW_e, te dolazi i do smanjena proizvodnje dimnih plinova, uz zadržavanje temperature od 594°C. Proizvodi se 596,83 t/h dimnih plinova te 174,02 t/h visokotlačne pare temperature 549°C i 20,03 t/h niskotlačne pare temperature 285,7°C. Održava se proizvodnja toplinske energije za potrebe grijanja od 80 MW_t, bez potrebe za proizvodnjom industrijske pare. Proizvodnja električne energije na plinsko-turbinskom generatoru iznosi 45,944 MW_e. Za 60%-tni *off-design mode* govorimo o proizvodnji električne energije na plinskim turbinama, u iznosu od 42,76 MW_e, popraćeno smanjenom proizvodnjom dimnih plinova (443,46 t/h uz 594°C), visokotlačne pare (128,81 t/h, 558,2°C) i niskotlačne pare (15,67 t/h, 284,3°C). U ovom režimu rada, uz ovakvo smanjenje produkcije, nije moguće održati zahtjev za proizvodnjom toplinske energije, te se proizvodi samo 71,053 MW_t za potrebe grijanja te 34 MW_e električne energije na parnoj turbini.



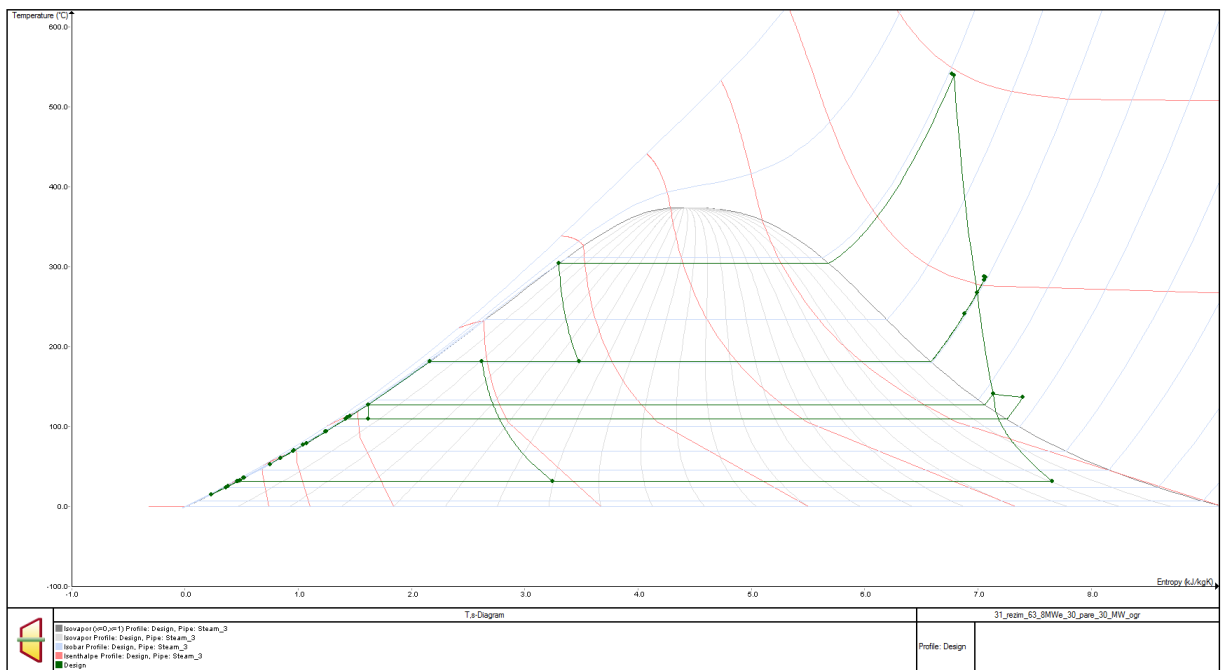
Slika 5.20: T, s - dijagram procesa 2. režima rada za različita opterećenja



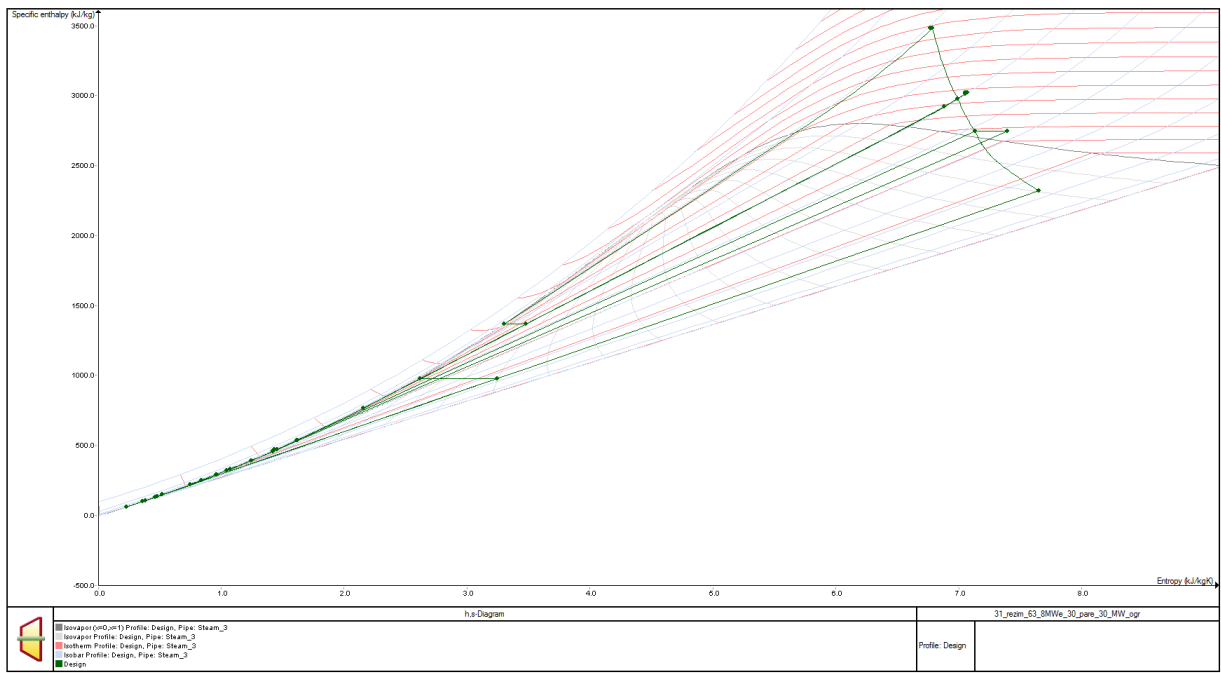
Slika 5.21: h, s - dijagram procesa 2. režima rada za različita opterećenja

5.2.3. 3. režim rada

U 3. režimu rada, pri 100%-tnom opterećenju plinsko-turbinskih generatora od 71,265 MW_e, producira se, kao i u 1. i 2. režimu, 753,32 t/h dimnih plinova, temperature 594°C na izlazu obje plinske turbine. Ti se dimni plinovi, kao i prije, iskorištavaju u izmjenjivačima i kotlovima generatora pare za produkciju približno 220,2 t/h visokotlačne pare tlaka 94,9 bar i temperature 540,8°C te 24,32 t/h niskotlačne pare tlaka 10,6 bar i temperature 287,31°C. Postignuta je proizvodnja 63,79 MW_e energije na električnom generatoru parne turbine, 30 MW_t energije za potrebe grijanja te 30 t/h industrijske pare temperature 240°C i tlaka 10,3 bar. Ovakvo stanje sustava predstavlja *design mode* za 3. režim rada.

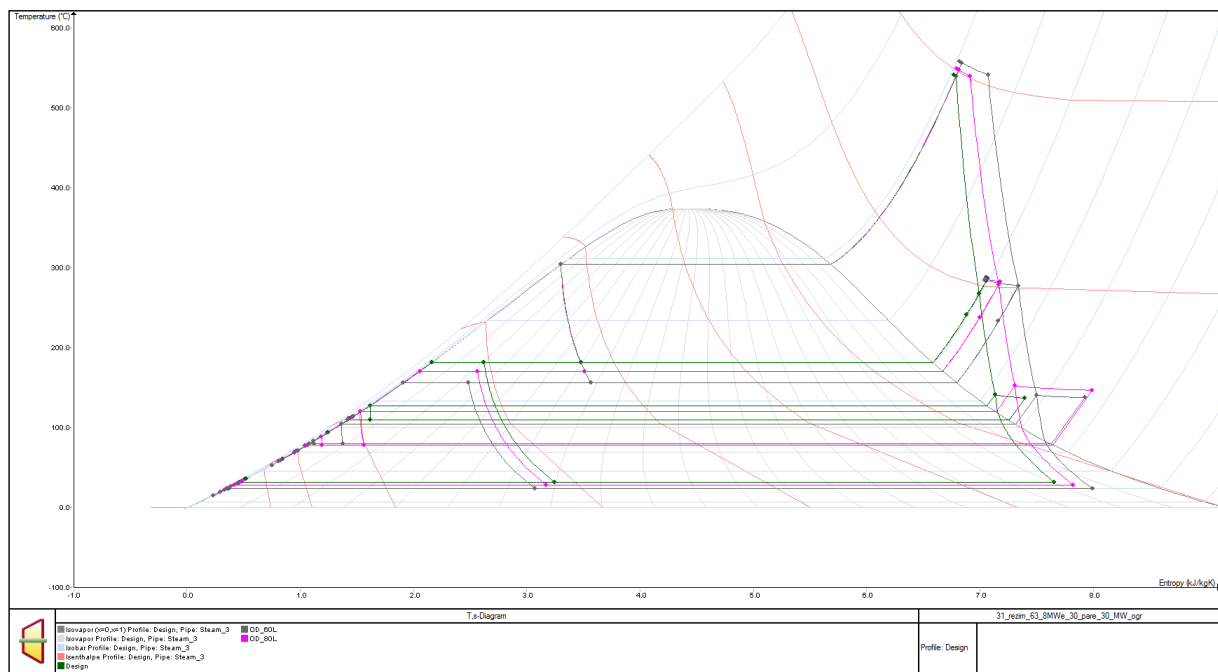


Slika 5.22: T, s - dijagram procesa za 3. režim rada

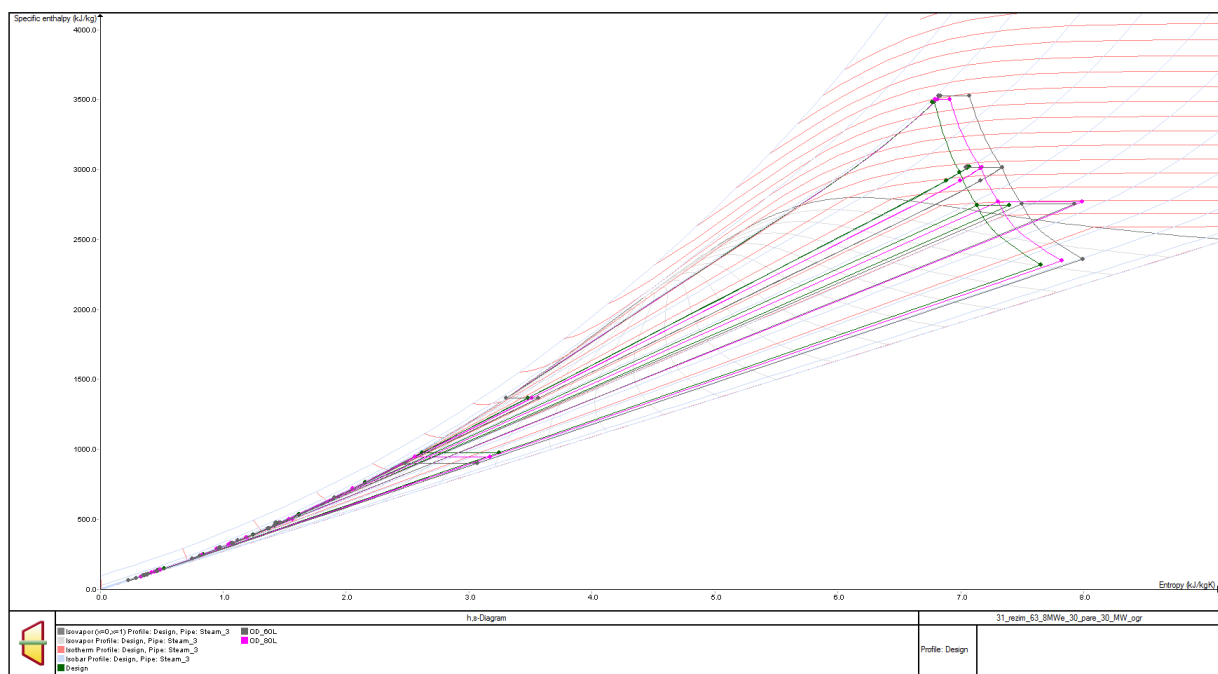


Slika 5.23: h, s - dijagram procesa za 3. režim rada

Dijagrami (Slike 5.22 i 5.23) prikazuju rad 3. režima rada za *design mode*. Potrebno je pokazati kako će se prikaz rada u T, s i h, s - dijagramu promijeniti za *off-design mode* istog režima (Slike 5.24 i 5.25). Rad sustava za 80%-tni *off-design mode* 3. režima rada prikazuje da proizvodnja električne energije na plinskim turbinama iznosi 57,01 MW_e, a proizvodnja dimnih plinova, uz zadržavanje temperature od 594°C, iznosi 596,83 t/h. Proizvodi se 174,02 t/h visokotlačne pare temperature 549°C i 20,03 t/h niskotlačne pare temperature 285,7°C. Održava se proizvodnja toplinske energije za potrebe grijanja od 30 MW_t i 30 t/h industrijske pare tlaka 7,97 bar i 238°C. Proizvodnja električne energije na plinsko-turbinskom generatoru iznosi 48,422 MW_e. Za 60%-tni *off-design mode*, proizvodnja električne energije na plinskim turbinama iznosi 42,76 MW_e, popraćena smanjenom proizvodnjom dimnih plinova (443,46 t/h, 594°C), visokotlačne (128,80 t/h, 558°C) i niskotlačne pare (15,66 t/h, 284,4°C). Uz spomenuto smanjenje produkcije pare, u ovom se režimu uspješno zadržava tražena proizvodnja toplinske energije od 30 MW_t i industrijske pare od 30 t/h, pri tlaku od 5,53 bar, uz smanjenje temperature pare na 232,7°C. Proizvodnja električne energije na generatoru parne turbine iznosi 34,187 MW_e.



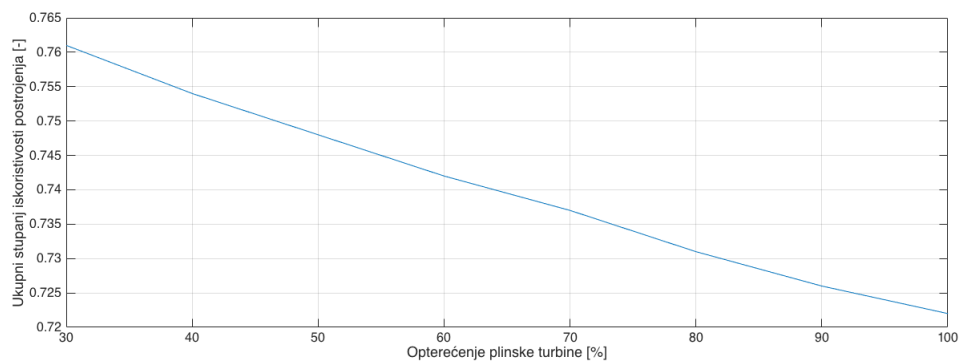
Slika 5.24: T, s - dijagram procesa 3. režima rada za različita opterećenja



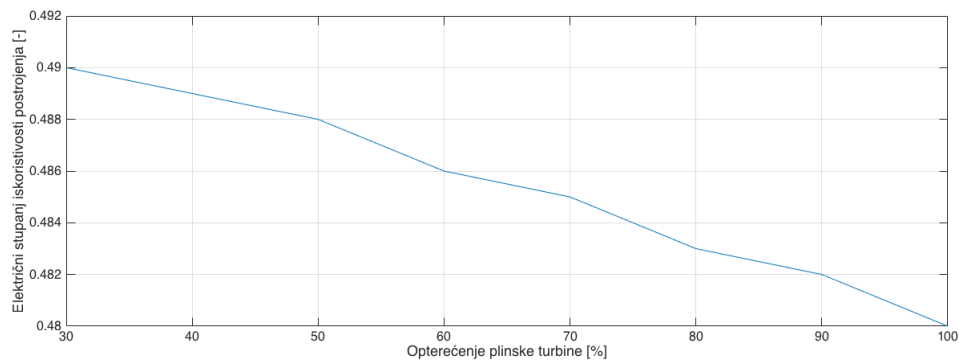
Slika 5.25: h, s - dijagram procesa 3. režima rada za različita opterećenja

5.3. Promjena stupnja iskoristivosti postrojenja

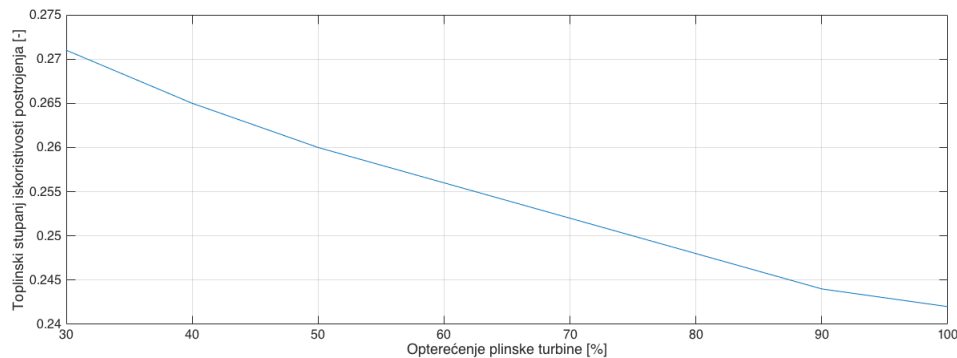
Nakon što je detaljno objašnjen utjecaj promjene stanja vanjskog zraka na značajne parametre sustava te je prikazano ponašanje sustava za različite režime rada u *design* i *off-design mode*-u, zanimljivo je promatrati promjenu stupnja iskoristivosti postrojenja. Promatrat ćemo promjenu ukupnog, električnog i toplinskog stupnja iskoristivosti postrojenja u ovisnosti o opterećenju električnih generatora plinskih turbina.



Slika 5.26: Promjena ukupnog stupnja iskoristivosti s promjenom opterećenja plinske turbine



Slika 5.27: Promjena električnog stupnja iskoristivosti s promjenom opterećenja plinske turbine



Slika 5.28: Promjena toplinskog stupnja iskoristivosti s promjenom opterećenja plinske turbine

Za prikazivanje promjene iskoristivosti postrojenja koristimo, primjerice, 2. režim rada za 80%-tno opterećenje električnog generatora plinske turbine. Povećavanjem opterećenja plinske turbine prema 100%-tnom, primjećuje se pad ukupnog stupnja iskoristivosti procesa. Smanjenjem opterećenja prema opterećenju od 30%, koje je ujedno i minimalno opterećenje koje je moguće postići ovom simulacijom, primjećujemo porast ukupnog stupnja iskoristivosti procesa (Slika 5.26). Dijagram (Slika 5.27) prikazuje da je porast opterećenja plinske turbine popraćen padom električnog stupnja iskoristivosti postrojenja, dok nam dijagram (Slika 5.28) prikazuje da je porast opterećenja plinske turbine popraćen padom toplinskog stupnja iskoristivosti postrojenja. Smanjenjem opterećenja plinske turbine povećava se raspoloživa toplina dimnih plinova na izlazu plinske turbine, koja se može iskoristiti u generatoru pare na otpadnu toplinu. Zbog toga, padom opterećenja raste iskoristivost postrojenja. Slični se rezultati mogu očekivati i za ostale režime rada.

Promjena ukupnog stupnja iskoristivosti za pojedine režime rada u *design* i *off-design mode* iznosi:

- U 1. režimu rada postiže se ukupna iskoristivost postrojenja od 51,4% te električna iskoristivost od 43,9% pri 100%-tnom opterećenju plinskih turbina, dok se za 80%-tno opterećenje postiže ukupna iskoristivost od 53,2% te električna iskoristivost od 44,1%, a za 60%-tno opterećenje ukupna iskoristivost od 56,7% te električna iskoristivost od 44,5%.

- U 2. režimu rada postiže se ukupna iskoristivost postrojenja od 67,6% te električna iskoristivost od 48,4% pri 100%-tnom opterećenju plinskih turbina, dok se za 80%-tno opterećenje postiže ukupna iskoristivost od 73,1% te električna iskoristivost od 48,3%, a za 60%-tno opterećenje ukupna iskoristivost od 77,5% te električna iskoristivost od 48,6%.
- U 3. režimu rada postiže se ukupna iskoristivost postrojenja od 56,6% te električna iskoristivost od 49,4% pri 100%-tnom opterećenju plinskih turbina, dok se za 80%-tno opterećenje postiže ukupna iskoristivost od 58,5% te električna iskoristivost od 49,4%, a za 60%-tno opterećenje ukupna iskoristivost od 61,1% te električna iskoristivost od 48,9%.

6 Zaključak

U ovom je radu bilo potrebno izraditi simulaciju rada kombiniranog kogeneracijskog postrojenja. Blok K *TETO Zagreb* predstavlja postojeće postrojenje koje svakodnevno ispunjava postavljene zahtjeve za opskrbom električnom i toplinskom energijom, kao i industrijskom parom.

Nastojalo se provjeriti, može li se dovoljno točno prikazati rad navedenog postrojenja, primjenom matematičkog modela, unutar programskog paketa *EBSILON Professional*. Korištenjem spomenutog programskog paketa, izrađena je simulacija postrojenja *TETO Zagreb*, pomoću blokova prisutnih unutar programskog sučelja. Korišteni blokovi predstavljaju simbolički prikaz komponenti postrojenja, a sadrže i niz funkcija, fizikalnih uvjeta i zakona, koji opisuju rad komponente u svezi s ostatkom sustava.

Napravljen je matematički model sustava i proveden je niz simulacija rada modela. Provjeren je utjecaj promjene parametara vanjskog zraka, korištenog u postrojenju, na rad sustava te promjenu značajnih vrijednosti u procesu. Također, provedena je i simulacija ponašanja različitih režima rada, za različita opterećenja sustava. Dobiveni se rezultati podudaraju s očekivanim ponašanjem sustava za različite režime rada i promjene parametara.

Možemo reći da kombinirana kogeneracijska postrojenja predstavljaju složeni sustav međuzavisnih elementa, u kojima promjene parametara rada jednog dijela sustava, imaju velik utjecaj na rad čitavog postrojenja.

Iako promjena stanja atmosferskog zraka, korištenog prilikom rada sustava, u prvu ruku ne izgleda relevantnom za rad sustava, zaključujemo, da će ona, ipak, imati utjecaja na proizvodnju sustava.

Zaključeno je da programski paket *EBSILON Professional* predstavlja, više nego prikladan, alat za izradu i provođenje simulacija kombiniranih kogeneracijskih postrojenja. Program dopušta jednostavnu izradu složenih sustava, uz zadovoljavajuće simulacije ponašanja realnih sustava u svakodnevnim režimima rada. Svojim mogućnostima i alatima, ovaj bi program mogao pružati pomoć u konstruiranju novih termoeenergetskih sustava te simuliranju rada postojećih.

Literatura

- [1] Slika preuzeta 01.02.2017. s <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8010582>.
- [2] Slika preuzeta 01.02.2017. s <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=8010582>.
- [3] Slika preuzeta 01.02.2017. s <http://machineryequipmentonline.com/hvac-machinery/basic-open-system-cyclesgas-turbine-brayton-cycle/>.
- [4] Slika preuzeta 01.02.2017. s https://www.c2es.org/docUploads/figure2_5.png.
- [5] Slika preuzeta 01.02.2017. s <http://www.i15.p.lodz.pl/strony/EIC/ec/technical-options.html>.
- [6] Slika preuzeta 02.02.2017. s <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>.
- [7] Slika preuzeta 02.02.2017. s <http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html>.
- [8] Hrvatska elektroprivreda d.d. TE-TO ZAGREB, 2003.
- [9] Hrvatska elektroprivreda d.d. TE-TO kombi kogeneracijsko postrojenje, 2003.
- [10] Slika preuzeta 02.02.2017. s https://www.steag-systemtechnologies.com/fileadmin/user_upload/steag-systemtechnologies.com/unsere_leistungen/EBSILON_R_Professional/EbsHTML/CCGT_plant/CCGT_Plant.htm.

- [11] Slika preuzeta 03.02.2017. s https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/Rankineov_ciklus_izgled.PNG.
- [12] Slika preuzeta 03.02.2017. s https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stodola%27s_cone_choked.svg#/media/File:Stodola%27s_cone_choked.svg.
- [13] Termoenergetska postrojenja - skripta s predavanja, 2017.
- [14] Galović, A. *Termodinamika II*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [15] Galović, A. *Termodinamika I*. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [16] EKONERG d.o.o. Tehničko-tehnološko rješenje usklađenja postojećih postrojenja TE-TO Zagreb, 2013.
- [17] Stodola, A. *Steam and gas turbines*. P. Smith, New York, 1945.
- [18] Generatori pare - skripta s predavanja, 2017.
- [19] Brooks, F. J. *GE Gas Turbine Performance Characteristics*, 2000.